

Widerstand flexibler Vegetation und Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Thomas Schoneboom
geboren am 31.03.1979
aus Emden

Eingereicht am 10.02.2011

Disputation am 28.10.2011

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Dittrich
Dr.-Ing. Juha Järvelä

2011

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Widerstandsverhalten flexibler, belaubter Vegetation und dem Sohlen- und Vegetationswiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern. Hierzu wurde im Rahmen von Laboruntersuchungen systematisch die Vegetationsdichte, die Vegetationsanordnung, die Sohlenrauheit, die Fließtiefe und die Pflanzenstruktur variiert, um den Anteil des Sohlen- und Vegetationswiderstandes am Gesamtfleißwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern zu untersuchen. Zur Quantifizierung des Vegetationswiderstandes wurde ein neues Kraftmesssystem entwickelt, welches eine direkte, und simultane Ermittlung der Widerstandskräfte von bis zu zehn Vegetationselementen mit einer hohen Genauigkeit ermöglichte, ohne das Strömungsfeld zu beeinflussen.

Um in den verschiedenen Experimenten identische flexible Vegetationselemente verwenden zu können, war es notwendig, künstliche Vegetationselemente zu nutzen. Dazu wurden Vergleichsmessungen zur Identifikation eines geeigneten künstlichen, flexiblen und belaubten Vegetationselementes durchgeführt. Die Versuche zeigten, dass neben der Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit auch der Einfluss der Blattfläche bei der Auswahl von geeigneten künstlichen Vegetationselementen herangezogen werden sollte. Im vorliegenden Fall wurde für natürliche als auch für die verwendete künstliche Vegetation eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft und der kumulativen einseitigen Blattfläche festgestellt.

Mit dem ausgewählten künstlichen Vegetationselement wurden die Hauptuntersuchungen zur Bestimmung des Sohlen- und Vegetationswiderstandes in Bewuchsfeldern durchgeführt. Zudem wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit bereits bestehenden Arbeiten Messungen mit starren, zylindrischen Vegetationselementen vorgenommen. Unabhängig davon, ob in den Experimenten identische flexible oder starre Elemente verwendet wurden, wiesen die Widerstandskräfte der individuellen Elemente eine hohe Bandbreite auf. Daraus ergab sich die Schlussfolgerung, dass die Messung der Widerstandskräfte eines einzelnen oder weniger Vegetationselemente im Bewuchsfeld zu einer signifikanten Fehleinschätzung der räumlich gemittelten Widerstandskraft führen kann. Es zeigte sich weiterhin, dass sich die flexiblen Vegetationselemente bei den gewählten Dichten und Anordnungen nicht gegenseitig beeinflussten und das Widerstandsverhalten des künstlichen Einzelelementes in einer ungestörten Strömung auf das Widerstandsverhalten in einem Bewuchsfeld übertragen werden kann.

Anhand von Vergleichsmessungen mit starren Zylindern konnte der Ansatz von LINDNER (1982) zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders in einem regelmäßigen Feld von umströmten Zylindern erstmals experimentell bestätigt werden. Die Anwendung des Verfahrens ist zu empfehlen, wenn keine direkte Bestimmung des Widerstandsbeiwertes möglich ist.

Die Ergebnisse zum Sohlenwiderstand zeigten, dass der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand in der gleichen Größenordnung wie der Vegetationswiderstand liegen kann und

nicht pauschal vernachlässigt werden darf. In den Versuchen mit den künstlichen Pappelzweigen und einer rauen Sohlenoberfläche lagen die Anteile zwischen 5% und 25%, bei der Verwendung von starren Zylindern wurde ein Anteil zwischen 18% und 28% bestimmt. Die Ergebnisse deuten zudem darauf hin, dass für die starren und flexiblen Elemente ein konstanter und von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit unabhängiger Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand angenommen werden kann. Weiterhin wurden für die Reihenanordnung höhere Anteile des Sohlenwiderstandes als bei versetzter Anordnung ermittelt und es wurde festgestellt, dass der Einfluss der Anordnung unter den gegebenen Randbedingungen nicht vernachlässigt werden darf.

Die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Sohlenwiderständen zeigte, dass der Ansatz von STRICKLER (1923), das logarithmische Fließgesetz und der Ansatz nach RAUPACH (1992) den Sohlenwiderstand unterschätzen und ungeeignet sind, den Sohlenwiderstand in einem durchströmten Bewuchsfeld aus flexibler Vegetation unter den gegebenen Randbedingungen zu bestimmen. Der Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) kann aufgrund einer hohen Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten des Sohlenwiderstandes für Zylinderanordnungen empfohlen werden.

Vergleichsmessungen der rauen mit einer glatten Sohlenoberfläche zeigte, dass der Einfluss der Oberflächenrauheit der Sohle durch den gewählten Versuchsaufbau quantifiziert werden kann. Für die Ableitung einer allgemeinen Widerstandsbeziehung sind weitere Untersuchungen erforderlich, in welchen eine weitere Variation der Vegetationseigenschaften und der Sohleneigenschaften durchgeführt werden muss.

In Versuchsreihen am Einzelelement wurde anhand von Büschen und Bäumen der Einfluss des Laubes auf die Widerstandskraft untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das Laub im Bereich sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten (bis 0,25 m/s) einen höheren Beitrag zur Widerstandskraft leisten kann als die Äste, und dass der Einfluss des Laubes auf die Widerstandskraft mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen weisen darauf hin, dass zwischen den Widerstandskräften im be- und entlaubten Zustand näherungsweise ein konstantes Verhältnis erreicht wird, wenn die Blätter vollständig stromlinienförmig ausgerichtet sind. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Versuche wird für zukünftige Untersuchungen die Entwicklung einer Widerstandsbeziehung empfohlen, in welcher der Einfluss des Laubes durch einen konstanten Faktor berücksichtigt wird. Weiterhin wird vorgeschlagen, pflanzenspezifische allometrische Beziehungen in die Entwicklung von Widerstandsbeziehungen einzubinden.

Abstract

The present work deals with the flow resistance of foliated flexible riparian vegetation and the contribution of bed shear stress and vegetative drag to total hydraulic resistance. In order to investigate the flow resistance of flexible vegetation, drag forces on up to ten vegetation elements were measured directly and simultaneously with specifically designed drag force measurement sensors. The drag force data were used to estimate bed shear stress and to assess its contribution to total hydraulic resistance dependent on vegetation density, vegetation pattern, bed roughness, flow depth and vegetation structure.

The experiments were carried out with artificial vegetation elements to ensure that plant characteristics did not change during the experiments. The artificial element type was chosen based on the results of comparative measurements between various artificial and natural vegetation elements. The experiments showed that the influence of leaf area should be considered in addition to the relationship between drag force and flow velocity when flexible leafy artificial vegetation elements are selected. In the present case, a linear relationship between drag force and the cumulative one-sided leaf area was found for natural and artificial vegetation.

The main experiments were carried out with the selected artificial vegetation element in order to determine the bed shear stress and drag forces in arrays of vegetation elements. In addition, experiments with rigid cylindrical vegetation elements were conducted to enable the comparability with existing publications.

The drag forces measured in the vegetation arrays showed a large spatial variability, regardless of whether identical flexible or rigid elements were used. This indicated that the spatially averaged drag forces are difficult to estimate based on measurements with a single element in an array. On the other hand, the results suggest that the spatially averaged drag force of a vegetation array can be determined in experiments with a single isolated element, given the results are corrected for the effect of the arrangement. However, this conclusion is only valid for the case of relatively sparse arrays in which the plants do not directly interact with each other.

The drag force measurements in arrays of rigid cylinders were used to confirm the approach outlined by LINDNER (1982) for the evaluation of the drag coefficients in a multicylinder array. The application of the approach is recommended if a direct determination of the drag coefficient is not possible.

The application of the shear stress superposition principle showed that the contribution of bed shear stress to total stress can be in the same order of magnitude as vegetation stress and should not be neglected a priori. In fact, the contribution of bed shear stress to total stress reached 5% to 25% for the experiments with the artificial poplar branches, and 18% to 28% for the experiments with the rigid cylinders. The results further indicated that the contribution of bed shear stress to total stress is constant for a given setup and independent from the mean flow velocity for the flexible and rigid elements. It was found that drag forces exerted by the vegetation elements were larger for the

staggered than for the in line pattern. Similarly, it was found that bed shear stress is in general larger for the in line setup than for the staggered setup.

The analysis of bed shear stress also revealed that existing approaches (STRICKLER 1923, RAUPACH 1992 and logarithmic law) underestimate bed friction. These approaches and the approach of TOLLNER ET AL. (1982) are inappropriate for the determination of bed friction in arrays of flexible vegetation elements. However, for arrays of rigid cylinders, the approach of TOLLNER ET AL. (1982) showed a good agreement between measured and calculated bed friction values.

Comparative measurements between a rough bed surface and a smooth bed surface showed that the influence of surface roughness of the bed can be quantified with the chosen experimental setup.

The influence of foliage on the drag forces was investigated in test series with single vegetation elements (shrubs and trees). For very low flow rates (up to 0.25 m/s), foliage contributes more significantly to total drag than the branches of the elements. However, the impact of foliage on the total drag forces decreases with increasing flow velocity. The results indicate that the drag force ratio between foliated and defoliated vegetation elements is approximately constant for completely streamlined leaves. Based on the results of this study, it is recommended to develop a resistance equation in which the influence of foliage is considered by a constant factor. It is further proposed to include plant-specific allometric relationships in the development of resistance equations in future studies.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojektes „Floodplain Flows: Interaction Flow - Vegetation“ mit der Kennung AB 137/3-1.

Dr.-Ing. Jochen Aberle möchte ich meinen besonderen Dank für seine uneingeschränkte Unterstützung aussprechen, die ich während der Projektbearbeitung und bei der Anfertigung dieser Arbeit erfahren habe. Im Besonderen möchte ich mich für die kommunikative Zusammenarbeit, einen vorbildlichen Wissenstransfer, seinen steten Einsatz für das Projekt und eine Vielzahl intensiver fachlicher Diskussionen bedanken, für die er jederzeit zu Verfügung gestanden hat. Seine fachlichen Beiträge, Denkanstöße und kritische Anmerkungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und haben meine persönliche und fachliche Entwicklung vorangetrieben. Die vertrauensvolle und freundschaftliche Zusammenarbeit habe ich sehr geschätzt.

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Dittrich gilt mein Dank für die vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung innerhalb des gesamten Zeitraumes meiner Tätigkeit am Institut. Insbesondere während der Endphase dieser Arbeit sind mir die gewährten Freiheiten sehr zu Gute gekommen.

Dr.-Ing. Juha Järvelä danke ich für die Bereitschaft als Berichterstatter zu fungieren und für die wertvollen Anregungen und Anmerkungen in der Endphase dieser Arbeit. Gleichzeitig danke ich Prof. Dr.-Ing. Günter Meon für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission und Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci für seine Tätigkeit als Prüfer.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen anderen Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Im Besonderen gilt mein Dank den Werkstattmitarbeitern Herrn Ecklebe, Herrn Lehmann und Herrn Neumann, die mit persönlichem Einsatz den Betrieb der Versuchseinrichtungen gewährleisteten und eine stets zuverlässige Versuchsdurchführung ermöglichten. Den studentischen Hilfskräften Stephan Niewerth und Benjamin Herzberg möchte ich für Ihre verlässliche Unterstützung bei der Durchführung der zahlreichen Versuchsreihen danken. Weiterhin danke ich den Projektpartnern/-Innen des EU-HYDRALAB III Projektes für die stets gute und konstruktive Zusammenarbeit.

Mein herzlichster Dank ist an Janna gerichtet, die viel Verständnis und noch mehr Geduld für viele Wochenenden und Abende aufbrachte und es viele Male vollbrachte, meine Motivation aufrecht zu erhalten.

Als Dank für die grenzenlose und selbstlose Unterstützung meiner Eltern, die mir das Studium ermöglichten und damit auch den Weg zur Promotion öffneten, möchte ich ihnen diese Arbeit widmen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Vorwort	VII
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Forschung.....	5
2.1 Widerstandsverhalten von Vegetation und Parametrisierungsansätze	6
2.1.1 Starre Vegetation	7
2.1.2 Flexible Vegetation.....	9
2.1.2.1 Parametrisierungsansätze.....	13
2.1.2.2 Einfluss der relativen Fließtiefe h/H und der vertikalen Verteilung der angeströmten Pflanzenteile.....	16
2.1.2.3 Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen: Skalierung und künstliche Vegetation	18
2.1.3 Allometrische Beziehungen natürlicher Vegetation	18
2.2 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Bewuchsfeldern	20
2.2.1 Vegetationswiderstand	22
2.2.1.1 Starre Vegetation	23
2.2.1.2 Flexible Vegetation.....	30
2.2.2 Sohlenwiderstand.....	33
2.3 Fazit und abgeleitete Untersuchungsschwerpunkte	43
3 Versuchseinrichtungen	47
3.1 Kraftmessgeräte	47
3.1.1 Funktionsprinzip und Aufbau	47
3.1.2 Kalibrierung	50
3.2 Versuchsrinne	52
3.3 Unterwasserkamera.....	54

3.4	Strömungskanal.....	55
3.5	CEHIPAR Schleppkanal	56
4	Vergleichbarkeit zwischen künstlicher und natürlicher Vegetation und Einfluss der Blattfläche auf den Vegetationswiderstand.....	59
4.1	Auswahl eines künstlichen Vegetationselementes.....	59
4.2	Einfluss des Laubes auf den Vegetationswiderstand	63
4.2.1	Blattflächeneinfluss bei einem künstlichen Pappelzweig	64
4.2.2	Blattflächeneinfluss bei natürlichen Pappelzweigen.....	69
4.2.3	Blattflächeneinfluss bei Bäumen und Sträuchern	72
4.3	Zusammenfassung.....	76
5	Vegetations- und Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern	79
5.1	Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der Vegetationsdichte und – anordnung.....	80
5.1.1	Vegetationswiderstand	82
5.1.1.1	Widerstandskräfte	82
5.1.1.2	Widerstandsbeiwerte C_D und frontal projizierte Flächen A_P	90
5.1.1.3	Biegeverhalten.....	95
5.1.2	Gesamtfließwiderstand.....	97
5.1.3	Sohlenwiderstand	98
5.2	Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der Sohlenrauheit	101
5.3	Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H	103
5.4	Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der vertikalen Blattflächenverteilung	106
5.5	Gegenüberstellung der Messergebnisse mit Berechnungsergebnissen aus Ansätzen zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes in Bewuchsfeldern.....	112
5.5.1	Ansatz von RAUPACH (1992).....	112
5.5.2	Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982).....	117
5.5.3	Ansatz von STRICKLER (1923) und das logarithmische Fließgesetz	119
5.5.4	Sohlennahe turbulente kinetische Energie (TKE)	120
5.6	Zusammenfassung.....	125
6	Zusammenfassung und Ausblick	129
7	Literaturverzeichnis	134
	Anhang.....	A-1

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a		Variable
a_x	[m]	Abstand der Vegetationselemente in longitudinaler Richtung
a_y	[m]	Abstand der Vegetationselemente in transversaler Richtung
A	[m ²]	Referenzfläche
A_b	[m ²]	Grundfläche der Sohlenoberfläche
A_i^*	[m ²]	frontal angeströmte Fläche einer teilumströmten Pflanze
A_M	[m ²]	momentabsorbierende Fläche
A_P	[m ²]	frontal projizierte Fläche
$A_{P,tot}$	[m ²]	gesamte projizierte Astfläche
A_S	[m ²]	absolute Querschnittsfläche aller Äste einer Pflanze bei $H/4$
A_Σ	[m ²]	kumulative einseitige Blattfläche
b		Variable
b	[m]	Breite der Rauheitselemente
$b_{1/2}$	[m]	halbe Breite der Nachlaufströmung
b_s	[m]	Breite des Biegestabes
B	[m]	Gerinnebreite
C	[m ^{1/2} /s]	Chézy-Koeffizient
C		Proportionalitätsfaktor
$C_{D,W}$	[-]	Gesamtwiderstandsbeiwert
C_R	[-]	Widerstandsbeiwert der Rauheitselemente
C_S	[-]	Widerstandsbeiwert der Sohle
$C_{L,P,F,D\perp,DO}$	[-]	Widerstandsbeiwert bezogen auf Liftkräfte, Druckunterschiede, Oberflächenreibung, frontal projizierte Fläche, benetzte Oberfläche
$C_{D\infty}$	[-]	Widerstandsbeiwert eines isolierten, einzelnen Zylinders
$C_{D\chi}$	[-]	artspezifischer Widerstandsbeiwert
$C'_{D,L}$	[-]	Widerstandsbeiwert infolge von Oszillationen
ΔC_D	[-]	Widerstandsbeiwert infolge von Schwerewellen
d	[m]	Durchmesser
d_m	[m]	mittlerer Astdurchmesser
d_r	[m]	charakteristischer Durchmesser
$d_{Sieb,m}$	[mm]	mittlerer Korndurchmesser einer Sieblinie
D_s	[m]	Stammdurchmesser bei $H/4$
e	[-]	Elementkonzentration
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
E_S	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul, empirisch nach FREEMAN ET AL. (2002)
EI	[Nmm ²]	Biegesteifigkeit

f	[-]	Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizient
f_x	[N]	Gesamtwiderstandskraft
F	[N]	Kraft
F_{45}	[N]	Kraft in Höhe des Zentrums der Blattmasse, welche das Vegetationselement um 45° neigt
F_D	[N]	Gesamtwiderstandskraft
F_R	[N]	Kraft, welche auf die Rauheitselemente einwirkt
F_S	[N]	Kraft, welche auf die Sohlenoberfläche einwirkt
$F'_{D,L}$	[N]	Widerstandskraft infolge von Oszillationen
Fr	[-]	Froude-Zahl
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Fließtiefe
h_s	[m]	Materialstärke
h_{tree}	[m]	Baumhöhe
H	[m]	Vegetationshöhe
H_1, H_2	[m]	Länge
i		Laufvariable
I	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment
k	[-]	Korrekturfaktor
k_s	[m]	äquivalente Sandrauheit
l	[m]	Länge, charakteristische Länge
L	[m]	Hebelarm
m	[1/m ²]	Vegetationsdichte, Pflanzendichte
m_e	[-]	empirische Konstante
m_l	[kg/m]	Masse pro Längeneinheit
m_s	[kg]	Masse eines Vegetationselementes
M	[Nm]	Biegemoment
$M_{L,S}$	[kg]	Blattmasse, Stammmasse
n		Zählvariable
n	[s/m ^{1/3}]	Manning Widerstandsbeiwert
N	[1]	Anzahl der Vegetationselemente
P	[-]	Anordnungsfaktor
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
R	[-]	Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeiten
R_h	[m]	hydraulischer Radius
R_S	[m]	äquivalenter hydraulischer Radius
R_t	[-]	Verhältnis der kritischen Sohlenschubspannungsgeschwindigkeiten
Re	[-]	Reynoldszahl
Re_d	[-]	Stamm-Reynoldszahl
s		empirische Standardabweichung

S	[%]	Neigung der Wasserspiegellage
u		Strömungskomponente in Fließrichtung
u_0	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit eines isolierten, einzelnen Zylinders
u_{020}	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit des Zylinders in Zylinderreihe 20
u_d	[m/s]	Geschwindigkeitsverlust
u_i	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit
u_m	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u_R	[m/s]	Referenzströmungsgeschwindigkeit
u^*	[m/s]	Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit
u_{*t}	[m/s]	kritische Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit
u_{*tS}	[m/s]	u_{*t} für eine freiliegende, erodierbare Oberfläche
u_{*tR}	[m/s]	u_{*t} für eine Oberfläche mit nicht erodierbaren Rauheitselementen
$u_{\Delta x, max}$	[m/s]	maximales, tiefengemitteltes Geschwindigkeitsdefizit in der Mitte der Nachlaufströmung
u_χ	[m/s]	geringste mittlere Fließgeschwindigkeit zur Bestimmung von χ
v		Strömungskomponente quer zur Fließrichtung
w		Strömungskomponente in vertikaler Richtung
W	[m ³]	Widerstandsmoment
x	[m]	Abstand hinter einem Zylinder in Fließrichtung
X		morphologische Variable
y_o	[m]	Oberwasserstand eines Zylinders
y_u	[m]	Unterwasserstand eines Zylinders
Y		morphologische Variable
z		Koordinate quer zur Strömungsrichtung, vertikale Richtung in Abschnitt 5.4
β	[-]	Parameter zur Beschreibung des Verhältnisses der Widerstandskoeffizienten der Sohle und der Rauheitselemente
Δ		Differenz
ε	[mm]	Dehnung
λ	[-]	Rauheits-Dichte-Parameter
ζE	[N/m ²]	artspezifischer Vegetationsindex
ρ	[kg/m ³]	Fluiddichte
σ_A	[-]	Verhältnis der Grundfläche zur frontal angeströmten Fläche
σ	[N/mm ²]	Druck- oder Zugspannung
τ, τ_0	[N/m ²]	Gesamtschubspannung
τ_0', τ_s	[N/m ²]	Sohlenschubspannung
τ_R, τ_0''	[N/m ²]	Schubbeanspruchung der Rauheitselemente
$\tau_{S, max}$	[N/m ²]	maximale Schubbeanspruchung der Sohle
τ_{TKE}	[N/m ²]	Schubspannung aus turbulenten kinetischen Energie TKE
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität

φ	[-]	Porosität
Φ	[-]	dimensionsloser Parameter
χ	[-]	artspezifischer Vegetationsparameter
ω	[1/s]	Eigenfrequenz

Abkürzungen

ADV	Akustik-Doppler-Velocimeter
CEHIPAR	Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo
DAM	Double Averaging Methodology
dbh	Stammdurchmesser in Brusthöhe
DFS	Kraftmessgerät (drag force)
DMS	Dehnungsmessstreifen
IDM	magnetisch induktives Durchflussmessgerät
LAI	Blattflächenindex (Leaf Area Index)
LDA	Laser-Doppler-Anemometry
PIV	Particle-Image-Velocimetry
TKE	Turbulente Kinetische Energie
TLS	Terrestrial Laser Scanning

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Bewuchsklassifizierung nach der relativen Überströmungshöhe. Aus DITTRICH & ABERLE (2010), modifiziert	2
Abb. 2.1	Widerstandsbeiwert C_D (hier C_W) in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re_d für einen starren Zylinder (aus SCHLICHTING & GERSTEN 2006)	8
Abb. 2.2	Verformung eines flexiblen Vegetationselementes in der Seitenansicht	9
Abb. 2.3	Schematische Darstellung des Widerstandsverhaltens flexibler Vegetationselemente	10
Abb. 2.4	Qualitative Geschwindigkeitsverteilung für überströmte und verschiedene durchströmte Vegetationsarten aus FISCHENICH (2000)	17
Abb. 2.5	Relative Anströmgeschwindigkeit als Funktion der Elementkonzentration zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders inmitten weiterer Zylinder nach LINDNER (1982).....	27
Abb. 3.1	Ansicht eines Kraftmessgerätes in und quer zur Strömungsrichtung (a) und eine Prinzipskizze quer zur Strömungsrichtung (b).	48
Abb. 3.2	Prinzipskizze des Kraftmessgerätes im Messbereich der Versuchsrinne	49
Abb. 3.3	Differenz zwischen gemessener und applizierter Kraft in Abhängigkeit der applizierten Kraft.....	51
Abb. 3.4	Messbereich der Versuchsrinne (a) und Versuchsrinne mit Blick in Strömungsrichtung (b) bei einer Vegetationsdichte $a_x = a_y = 20\text{cm}$	53
Abb. 3.5	(a) Seitenansicht der Unterwasserkamera und (b) Bestimmung der angeströmten Fläche A_p mit der Software „DatInf® Measure“ am Beispiel eines künstlichen Pappelzweiges bei einer Strömungsgeschwindigkeit $u_m = 0,49\text{ m/s}$	55
Abb. 3.6	(a) Geschlossener Strömungskanal mit Propellerantrieb und Messbereich incl. Aufbauten. (b) Ansicht des Messbereichs mit über Kopf montiertem DFS und Vegetationselement unter Strömungseinfluss.	56
Abb. 3.7	(a) Ansicht des CEHIPAR Schleppkanals in Fahrtrichtung der Hinfahrt und (b) Messbrücke mit Messcontainer während einer Rückfahrt.	57
Abb. 4.1	(a) Vergleich des Widerstandsverhaltens des künstlichen und natürlichen Pappelzweiges 1 und (b) eines künstlichen und natürlichen Weidenzweiges im Vergleich mit einer künstlichen Seggenart. Volle Symbole markieren Kräfte, offene Symbole Hebelarme, durchgeführt in der Versuchsrinne.	61
Abb. 4.2	Widerstandsverhalten des künstlichen und des natürlichen Pappelzweiges 2. (a) Vergleich der über die Blattfläche normierten Widerstandskraft und (b) der Widerstandskraft in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Geschlossene Symbole markieren Kräfte, offene Symbole Hebelarme, durchgeführt im Strömungskanal.	62
Abb. 4.3	Künstlicher Pappelzweig bei verschiedenen Belaubungsstufen. Von links nach rechts: Stamm mit Blüte, Stamm mit Ästen an die jeweils ein Blatt befestigt sind, Stamm mit Ästen und jeweils zwei Blättern, Stamm mit Ästen und jeweils 3 Blättern (vollständig belaubt).	64
Abb. 4.4	a) Frontal projizierte Fläche A_p , b) Widerstandskraft F_D , c) Widerstandsbeiwert C_D , und d) $C_D A_p$ als Funktion der einseitigen kumulativen Blattfläche A_Σ für $u_m = 0,20\text{ m/s}$ (Rauten) und $0,49\text{ m/s}$ (Quadrate) und das Verhältnis der Widerstandskräfte (Dreiecke).	66

Abb. 4.5	Vergleich der Widerstandskräfte der künstlichen Pappel bei höchster Belaubungsstufe in der Versuchsrinne (Rauten) und dem Strömungskanal (offene Dreiecke). Dargestellt sind die Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.	68
Abb. 4.6	Versuchsergebnisse des künstlichen Pappelzweiges in der Versuchsrinne ($u_m = 0,20$ m/s und $0,49$ m/s) und dem Strömungskanal ($u_m = 0,61$ m/s, $0,77$ m/s und $1,12$ m/s). (a) Widerstandskraft und (b) über die Fließgeschwindigkeit normierte Widerstandskraft in Abhängigkeit der einseitigen kumulativen Blattfläche.	68
Abb. 4.7	Widerstandskräfte in Abhängigkeit der kumulativen einseitigen Blattfläche für Pappel 1 (a1), Pappel 2 (a2), Pappel 3 (a3) und die Quotienten aus den über die Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräften in Abhängigkeit der kumulativen einseitigen Blattfläche für Pappel 1 (b1), Pappel 2 (b2) und Pappel 3 (b3).	71
Abb. 4.8	(a) Mittelwerte der über die Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräfte und (b) der über die Blattfläche und der Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräfte (b) von Pappel 1, 2 und 3 in Abhängigkeit der Blattfläche.	72
Abb. 4.9	Widerstandskräfte F_D in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeiten u_m für ausgewählte Weiden (a) und Erlen (b) im be- und entlaubten Zustand.	74
Abb. 4.10	Kräfteverhältnis $F_{D,Ratio}$ für (a) die Weiden und (b) die Erlen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit.	75
Abb. 5.1	Draufsicht des Messbereichs und Darstellung der verschiedenen Vegetationsanordnungen. Versetzte Anordnung links, Reihenanordnung rechts. Abstände a_x und a_y von oben nach unten: 30, 20, 15 cm. Farblich hervorgehobene Vegetationselemente sind an Kraftmessgeräte angeschlossen. Dargestellt sind künstliche Pappelzweige.	81
Abb. 5.2	Draufsicht des Messbereichs und Darstellung der verschiedenen Vegetationsanordnungen. Versetzte Anordnung links, Reihenanordnung rechts. Abstände $a_x = a_y = 20$ cm. Farblich hervorgehoben sind Vegetationselemente, an Kraftmessgeräte angeschlossen sind. Dargestellt sind starre Zylinder.	81
Abb. 5.3	(a) Standardabweichungen und (b) Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte mit einer Messdauer von 60 Sekunden für die Anordnungen 30S (volle Kreise, 8 DFS) und 30L (offene Kreise, 10 DFS) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.	83
Abb. 5.4	(a) Mittelwerte der Standardabweichung und (b) des Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Messdauer der Zeitreihen betrug 60 Sekunden, bei der Reihenanordnung wurde mit 10 DFS und bei der versetzten Anordnung mit 8 DFS gemessen.	83
Abb. 5.5	(a) Standardabweichungen und (b) Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte mit einer Messdauer von 60 Sekunden für die Anordnungen 20L_Zyl (offene Rauten, 10 DFS) und 20S_Zyl (geschlossene Rauten, 10 DFS) sowie der einzelnen Zylinder aus Stahl (ZylStahl) und Kunststoff (ZylKunst) in einer ungestörten Strömung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.	84
Abb. 5.6	Räumliche Variabilität der Widerstandskräfte der künstlichen Pappeln. (a) DFS01 bis DFS05 bei Anordnung 30S, (b) DFS01 bis DFS10 für die Anordnungen 30S (volle Kreise) und 30L (offene Kreise) sowie räumlich gemittelte Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ (Linien).	86
Abb. 5.7	Räumliche Variabilität der Widerstandskräfte der künstlichen Pappeln und der starren Zylinder. (a) Standardabweichung, (b) Variationskoeffizient in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.	87

Abb. 5.8	Räumlich gemittelte Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m für die Versuchsreihen der künstlichen Pappeln und der Zylinder im Bewuchsfeld sowie der drei isolierten Einzelelemente: künstliche Pappel, Kunststoffzylinder und Stahlzylinder.	88
Abb. 5.9	(a) Variabilität der frontal projizierten Fläche A_P und (b) des Widerstandsbeiwertes C_D der künstlichen Pappelzweige in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m der Anordnungen 30L (offene Symbole) und 30S (volle Symbole).	91
Abb. 5.10	(a) Variabilität der frontal projizierten Fläche A_P und (b) des Widerstandsbeiwertes C_D der künstlichen Pappelzweige bei der Anordnung 30S.	91
Abb. 5.11	Variabilität der Widerstandsbeiwerte C_D in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Anordnungen 20L_Zyl (offene Rauten) und 20S_Zyl (volle Rauten).	92
Abb. 5.12	(a) Räumlich gemittelte frontal projizierte Fläche $\langle A_P \rangle$ und (b) Widerstandsbeiwert $\langle C_D \rangle$ der flexiblen Vegetationselemente in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	93
Abb. 5.13	(a) Räumlich gemittelte Widerstandsbeiwerte der Zylinderanordnungen im Bewuchsfeld und der Einzelelemente und (b) im Vergleich zu den Messungen von WIESELSBERGER (aus SCHLICHTING & GERSTEN 2006) in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re_d	93
Abb. 5.14	(a) Variation des Hebelarmes L der Anordnungen 30S (geschlossene Symbole) und 30L (offene Symbole) und (b) räumlich gemittelter Hebelarm $\langle L \rangle$ für alle Anordnungen in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.	96
Abb. 5.15	(a) Gesamtschubspannung und (b) über die Vegetationsdichte m und die Anordnung P normierte Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	97
Abb. 5.16	Sohlenschubspannung τ_0' in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (a) und in Abhängigkeit der Gesamtschubspannung (b).	99
Abb. 5.17	Anteil der Sohlenschubspannung τ_0' an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	100
Abb. 5.18	Gesamtschubspannung ρghS (a) und räumlich gemittelte Vegetationswiderstandskraft $\langle F_D \rangle$ (b) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	102
Abb. 5.19	Sohlenschubspannung τ_0' in Abhängigkeit der Gesamtschubspannung (a) und Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m (b). Vergleich zwischen rauher und glatter Sohlenoberfläche.	102
Abb. 5.20	(a) Fließtiefe h in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m und (b) die Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H für die Versuchsreihe 15L_varh bei konstanter Sohlenneigung $S = 0,75\%$	103
Abb. 5.21	Darcy-Weisbach f'' normiert über LAI in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H	104
Abb. 5.22	(a) Sohlenschubspannung τ_0' und (b) Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H	105
Abb. 5.23	Ansichten der Vegetationselemente in den Versuchsreihen mit variabler vertikaler Blattflächenverteilung. Ansicht entgegen der Strömungsrichtung in (a) ohne Strömungseinfluss und in (b-f) unter Strömungseinfluss im geneigten Zustand. Die Fotos (b-f) wurden während der Experimente mit der Unterwasserkamera aufgenommen.	107
Abb. 5.24	(a) Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ und (b) normierte Widerstandskraft in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der vertikalen Blattflächenverteilung.	108

Abb. 5.25	Frontal projizierte Fläche $\langle A_p \rangle$ (a) und über die Blattfläche normierte frontal projizierte Fläche (b) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	108
Abb. 5.26	Widerstandsbeiwert $\langle C_D \rangle$ in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m	109
Abb. 5.27	Räumliche gemittelte Geschwindigkeitsprofile, normiert über die mittlere Fließtiefe h und die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit u_m	110
Abb. 5.28	(a) Sohlenschubspannung τ_0' und (b) Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m für die Versuchsreihen 20S, 20S123X, 20S_12XX, 20S_1XXX und 20S_12X4 mit variierender vertikaler Blattflächenverteilung.	111
Abb. 5.29	Gegenüberstellung zwischen gemessenen Werten und nach der Theorie von RAUPACH (1992) berechneten Werten des Verhältnisses R zwischen Sohlenschubspannung und Gesamtschubspannung.	114
Abb. 5.30	Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit R_t in Abhängigkeit der Elementdichte λ . Neben den Ergebnissen aus Modellversuchen unterschiedlicher Autoren sind die Ergebnisse aus numerischen Berechnungen von TURPIN ET AL. (2010) und die Ergebnisse der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit dargestellt. Die Abbildung wurde aus TURPIN ET AL. (2010) entnommen und modifiziert.....	116
Abb. 5.31	Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit R_t in Abhängigkeit der Elementdichte λ . Ergebnisse der Versuchsreihen dieser Arbeit im Vergleich mit den Zylinderdaten von THOMPSON ET AL. (2004) und den theoretischen Ergebnissen nach RAUPACH (1992).....	117
Abb. 5.32	Vergleich der gemessenen Sohlenschubspannungen mit den berechneten Werten nach TOLLNER ET AL. (1982)	118
Abb. 5.33	Gemessene und berechnete Widerstandskoeffizienten f^* der Sohle als Funktion der relativen Überdeckung h/k_s	120
Abb. 5.34	a) Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' und b) τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für die Versuchsreihen mit vollständig belaubten Pappelzweigen.....	121
Abb. 5.35	a) Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' und b) τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für die Versuchsreihen mit glatter Sohle und starren Zylindern	122
Abb. 5.36	Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' für $\Delta z = 0,45$ cm in a) und für $\Delta z = 1,45$ cm in c). τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für $\Delta z = 0,45$ cm in b) und für $\Delta z = 1,45$ cm in d) für die Versuchsreihen mit variabler Blattflächenverteilung.	123

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Parameter der Vegetationselemente zur Auswahl eines künstlichen Elementes	59
Tab. 4.2	Pflanzenparameter der natürlichen Pappelzweige 1-3	70
Tab. 5.1	Hydraulische Verhältnisse, gemessene Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ und –beiwerte $C_{Di}^{(a)}$ und berechnete Widerstandsbeiwerte $C_{Di}^{(b)}$ nach dem Verfahren von LINDNER (1982).....	94

1 Einleitung

Die einst natürlichen Fließgewässer sind in der Vergangenheit stark durch den Eingriff des Menschen verändert und geprägt worden. Wirtschaftliche Interessen und Siedlungsdruck haben neben anderen vielfältigen Beweggründen dazu geführt, dass Fließgewässer begradigt und Überschwemmungsflächen reduziert wurden. Deiche rückten im Laufe der Jahrzehnte näher an die Hauptgerinne heran und wurden schrittweise erhöht. Um das Hochwasserrisiko zu reduzieren, wurden die Vorländer der Flüsse intensiv unterhalten und Vegetation in Form von Büschen und Bäumen weitgehend entfernt. Im Zuge dieser Entwicklung verloren Fließgewässer viel von ihrem ursprünglichen, natürlichen Charakter und ihrem ökologischen Wert.

Heute werden diese Fließgewässer wieder in einen naturnahen Zustand zurückversetzt und ihr ökologischer Zustand verbessert. Dies geschieht nicht zuletzt aufgrund eines steigenden öffentlichen Interesses an einer naturnahen Gestaltung der Fließgewässer. Weiterhin wird es aus ökologischer aber auch wirtschaftlicher Sicht angestrebt, die Gewässerunterhaltung weniger intensiv zu betreiben. Eine extensivere Gewässerunterhaltung begünstigt die natürliche Sukzession, die mit einem Wiederaufkommen von busch- und baumartiger Vegetation verbunden ist. Baum- und buschartige Vegetation erhöht jedoch den hydrodynamischen Strömungswiderstand eines Fließgewässers, was wiederum zu einer Verschärfung der Hochwassergefahr führen kann.

Die Bestimmung des Strömungswiderstandes natürlicher Vegetation stellt aufgrund der enormen strukturellen Vielfalt, die Vegetation aufweist, eine große Herausforderung dar. Neben hochflexiblen Gräsern und Wasserpflanzen reicht Vegetation bis hin zu dichtem Buschwerk und Bäumen mit bis zu mehreren Metern Stammdurchmesser. Die Art und Weise wie sich die Vegetation in der Strömung verhält, mit ihr interagiert und zu einem Strömungswiderstand führt, hängt einerseits von der Strömung ab, andererseits aber auch von der Vegetationsart. Daher wird in der Regel eine Unterscheidung in Abhängigkeit der Hydraulik und der Vegetationsart vorgenommen. Im Allgemeinen wird zwischen überströmter und durchströmter Vegetation unterschieden, da sich das Strömungsfeld signifikant ändert, wenn die Fließtiefe h die Vegetationshöhe H überschreitet (DITTRICH & ABERLE 2010). Weiterhin wird bei dem Widerstandsverhalten von Vegetation unter Strömungseinfluss zwischen starrer und flexibler Vegetation unterschieden.

Die Unterscheidung zwischen über- und durchströmter Vegetation sowie flexibler und starrer Vegetation reicht jedoch nicht aus, die Strömungsverhältnisse, die aus der Komplexität der Interaktion zwischen Strömung und Vegetation resultieren, zu beschreiben. Auf der Grundlage eines in BÖLSCHER ET AL. (2005) beschriebenen Klassifizierungskonzeptes stellten DITTRICH & ABERLE (2010) ein erweitertes Klassifizierungskonzept vor. Darin erfolgt eine Klassifizierung nach der relativen Überströmungshöhe h/H , nach der relativen Breite des Gerinnes B/h und nach der relativen Länge des Vegetationsbestandes. Weiterhin erfolgt die Unterteilung in starre und flexible Vegetation.

Das Klassifizierungskonzept verdeutlicht die große Bandbreite der Kombinationen zwischen verschiedenen Vegetationsarten mit verschiedenen Fließtiefen, Gerinnegeometrien und Vegetationsanordnungen. Die Komplexität der Zusammenhänge und der Interaktionen zwischen Strömung und Vegetation erfordern eine Fokussierung, wobei in dieser Arbeit ein Teilbereich des Klassifizierungskonzeptes nach der relativen Überströmungshöhe h/H bearbeitet wird, ohne den Einfluss der relativen Gerinnebreite und der relativen Vegetationslänge zu berücksichtigen.

Die Klassifizierung nach der relativen Überströmungshöhe durch DITTRICH & ABERLE (2010) erfolgte in die drei Kategorien, Vegetation geringer Höhe mit $h/H \geq 5$, Vegetation mittlerer Höhe mit $1 < h/H < 5$ und Vegetation großer Höhe mit $h/H < 1$ (vgl. Abb. 1.1).

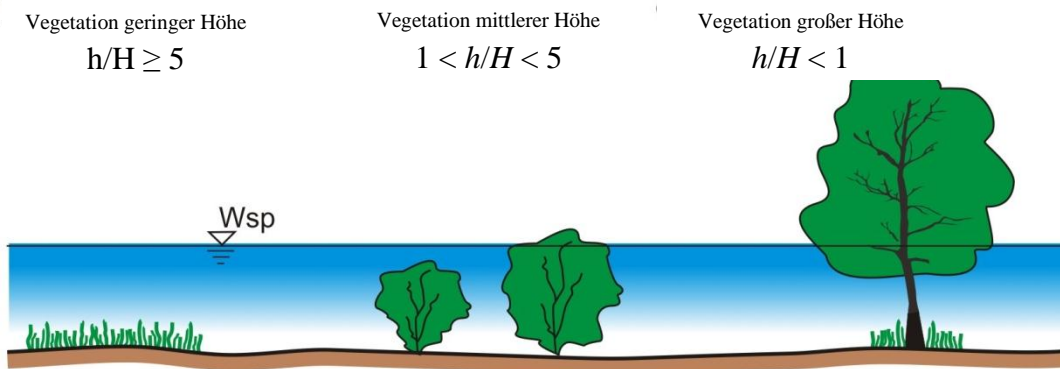


Abb. 1.1 Bewuchsklassifizierung nach der relativen Überströmungshöhe. Aus DITTRICH & ABERLE (2010), modifiziert.

In Vegetation geringer Höhe mit $h/H \geq 5$ können Gräser und aquatische Vegetation eingeordnet werden, die aufgrund ihrer hohen Dichte und hohen Flexibilität nur eine geringfügige Durchströmung erfahren und im Wesentlichen überströmt werden. Der Fließwiderstand von Vegetation geringer Höhe kann als Sohlenrauheit definiert werden und ist einziger Bestandteil des Gesamtwiderstandes. Die Bestimmung erfolgt anhand der Strömungsparameter in der vegetationsfreien Zone, wobei sich über der Vegetationsschicht in der Regel eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung ausbildet (DITTRICH & ABERLE 2010).

Vegetation mittlerer Höhe mit $1 < h/H < 5$ wird bereits zu einem nicht vernachlässigbaren Anteil durchströmt. Das Geschwindigkeitsprofil kann horizontal in drei Schichten unterteilt werden. Innerhalb der Vegetation liegt eine vegetationsbeeinflusste Schicht vor. Oberhalb der Vegetation wird die Schicht als Schicht der freien Wasserspiegeloberfläche bezeichnet. Im Übergangsbereich dieser Schichten entsteht eine Mischungsschicht, die als freie Scherschicht definiert ist und durch die hohen Geschwindigkeitsunterschiede der vegetationsbeeinflussten Schicht und der Schicht der freien Wasserspiegeloberfläche hervorgerufen wird. Vegetation mittlerer Höhe kann sowohl aquatische Vegetation und Gräser aber auch busch- und baumartige Vegetation darstellen. Untersuchungen zu Vegetation mittlerer Höhe konzentrieren sich überwiegend auf die Interaktion zwischen Strömung und Vegetation in der Mischungsschicht zur Charakterisierung der Strömungsparameter.

Bei einer geringen Überströmungshöhe, die an die Vegetationshöhe heranreicht, geht Vegetation mittlerer Höhe in Vegetation großer Höhe ($h/H < 1$) über, wobei sich das vertikale Geschwindig-

keitsprofil signifikant verändert. Vegetation großer Höhe bezieht sich für gewöhnlich auf Büsche und Bäume die flexibel aber auch starr sein können. Bei einem starren Verhalten zeigten Untersuchungen mit zylindrischen Elementen ein nahezu konstantes Geschwindigkeitsprofil über die Fließtiefe. Bei flexibler, belaubter Vegetation ist das Geschwindigkeitsprofil wesentlich von den individuellen Vegetationseigenschaften und der vertikalen Verteilung der Rauheitselemente (Pflanzenstruktur) abhängig.

Mit Vegetation großer Höhe sind bis heute eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt worden, in welchen das Widerstandsverhalten von Vegetation in Abhängigkeit verschiedener Vegetationsparameter, -dichten und -anordnungen untersucht wurde. Dennoch ist es bis heute nicht gelungen einen universellen Ansatz zu entwickeln, mit welchem der Vegetationswiderstand a priori berechnet werden kann. Dies ist unter anderem auf die enorme Bandbreite artspezifischer Vegetationseigenschaften, standortspezifischer Einflussfaktoren und der komplexen Interaktion zwischen Strömung und Vegetation zurückzuführen. Obwohl in der Vergangenheit überwiegend Versuche mit starren Zylindern durchgeführt wurden, deren Widerstandsverhalten eindeutig beschrieben werden kann, ist es allgemein anerkannt, dass diese ungeeignet sind das Widerstandsverhalten flexibler und belaubter Vegetation adäquat abzubilden und, dass insbesondere die Flexibilität das Widerstandsverhalten beeinflusst und Laub den Vegetationswiderstand um ein Vielfaches erhöhen kann.

Weiterhin nimmt Vegetation neben der unmittelbaren Erhöhung des Fließwiderstandes eine Schlüsselfunktion bei der Erosion, dem Transport und bei Ablagerungsprozessen von Feststoffen, Nährstoffen und Schadstoffen ein (JÄRVELÄ ET AL. 2006). Obwohl baum- und buschartige Vegetation eine lokale Erhöhung der Sohlenschubspannung erzeugen kann, die lokal zu Erosion und Kolkbildung führt, ist mit der Präsenz von Vegetation im Allgemeinen eine Verringerung der Sohlenschubspannungen verbunden, was zur Sedimentation und Stabilisierung von Sedimenten führt (JORDANOVA & JAMES 2003). Sedimentablagerungen können die Abflusskapazität bei Hochwasserereignissen reduzieren (DITTRICH & JÄRVELÄ 2005) und somit die Hochwassergefahr zusätzlich verschärfen.

Aussagen über die Auswirkungen naturnaher Umgestaltungsmaßnahmen sind daher nur möglich, wenn der Vegetationswiderstand und die Sohlenschubspannungen in Bewuchsfeldern genau vorhergesagt werden können.

Während in Laborversuchen die Widerstandskräfte von Vegetation durch direkte Kraftmessungen unmittelbar quantifiziert werden können, ist die Bestimmung des Sohlenwiderstandes in einem Bewuchsfeld weitaus schwieriger und Untersuchungen sind rar. Folglich stehen bis heute keine Ansätze zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes in einem flexiblen durchströmten Bewuchsfeld zur Verfügung. Dies hat wiederum zur Folge, dass zur Abschätzung des Sohlenwiderstandes Annahmen getroffen werden müssen und Verfahren angewendet werden, die für durchströmten Bewuchs nicht gültig sind.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Stand der Forschung zum Sohlen- und Vegetationswiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern aus flexibler, belaubter Vegetation zu erweitern

und zu einem besseren Verständnis des komplexen Widerstandsverhaltens von flexibler, belaubter Vegetation beizutragen. Dazu werden experimentelle Untersuchungen im Labor des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig durchgeführt.

Zunächst wird im nachfolgenden Kapitel 2 der Stand der Forschung zum Widerstandsverhalten natürlicher, flexibler und starrer Vegetation zusammengefasst und bestehende Ansätze zur Parametrisierung des Widerstandsverhaltens beschrieben. Zudem werden neue Wege zur Parametrisierung von Vegetation durch die Verwendung allometrischer Beziehungen aufgezeigt. Weiterhin wird der Stand der Forschung zum Sohlen- und Vegetationswiderstand im Bewuchsfeld zusammengefasst und abschließend werden die Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit abgeleitet.

Die Versuchseinrichtungen, welche zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen verwendet werden, werden in Kapitel 3 beschrieben. Darin wird insbesondere ein neu entwickeltes Kraftmessgerätes vorgestellt, welches mit einer hohen Genauigkeit eine direkte Messung der Vegetationswiderstandskräfte ermöglicht, ohne die Strömung zu beeinflussen da es unterhalb der Gerinnesohle angeordnet ist.

Die experimentellen Untersuchungen selbst sind zweigeteilt und bauen aufeinander auf. In Kapitel 4 wird der erste Teil der Versuche und der Versuchsergebnisse über die Vergleichbarkeit natürlicher und künstlicher Vegetation beschrieben. Dieser Teil der Versuche wird mit dem Ziel durchgeführt, ein künstliches Vegetationselement zu bestimmen, dessen Widerstandsverhalten mit seinen natürlichen Gegenstücken vergleichbar ist. Ein geeignetes künstliches Vegetationselement bildet die Voraussetzung zur Einhaltung der Randbedingungen des zweiten Teils der experimentellen Untersuchungen - eine homogene Verteilung des Vegetationswiderstandes in einem Bewuchsfeld und konstante Vegetationseigenschaften während der gesamten Versuchsdauer.

Mit dem künstlichen Vegetationselement wird im zweiten Teil der experimentellen Untersuchungen, in Kapitel 5, der Sohlen- und Vegetationswiderstand in Bewuchsfeldern untersucht. Zur besseren Vergleichbarkeit mit bereits bestehenden Arbeiten werden zudem Messungen mit starren, zylindrischen Vegetationselementen durchgeführt. Als veränderliche Parameter werden die Vegetationsdichte und die Vegetationsanordnung, die relative Fließtiefe, die Sohlenrauheit und die vertikale Verteilung der Blattfläche variiert. Weiterhin ermöglicht der innovative Versuchsaufbau erstmals die Untersuchung der räumlichen Variabilität der Widerstandskräfte, der Widerstandsbeiwerte und der frontal angeströmten Flächen der Vegetationselemente, welche mit einer Unterwasserkamera bestimmt werden. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Messergebnisse mit Berechnungsergebnissen aus bestehenden Ansätzen zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst und Anregungen zu weiteren Untersuchungen gegeben.

2 Stand der Forschung

Das Widerstandsverhalten von natürlicher Vegetation ist eine fachübergreifende Problemstellung, die im Bereich von Wasserströmungen, aber auch von Luftströmungen untersucht wird. Hintergrund für die Untersuchungen im Bereich von Luftströmungen sind beispielsweise Sturmschäden an Waldkanten, die in der Folge von Starkwindereignissen und den damit verbundenen starken Böen auftreten. Dabei richtet sich das Augenmerk neben die auf das Vegetationselement wirkende Widerstandskräfte auch auf die Standfestigkeit der Bäume, da in der Regel Schäden infolge einer Entwurzelung durch einen Windwurf auftreten. Weiterhin werden Untersuchungen über die Eignung natürlicher Vegetation als Windschutz durchgeführt, die im Vergleich mit teildurchlässigen künstlichen Strukturen getestet werden.

Ein zentraler Bereich der Baumstatik ist die Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen (vgl. WESSOLLY & ERB 1998, SINN 2003). Dafür stellen die wirkenden Windlasten die maßgebende Eingangsgröße dar. Die Baumstatik befasst sich auch mit dem strukturellen Aufbau und den Materialeigenschaften von Bäumen und mit deren Veränderung während der Alterung. Damit wird durch die Baumstatik die Verbindung zur Allometrie hergestellt, welche die Größe eines Körpers in Beziehung zu verschiedensten biologischen Größen setzt und deren Veränderung, beispielsweise durch Alterung, berücksichtigt. Allometrische Beziehungen werden unter anderem in der Biologie und in der Forstwirtschaft angewendet.

Der Sohlenwiderstand in einem Bewuchsfeld ist ebenfalls im Bereich der Luftströmungen von Interesse. Die zu beantwortende Fragestellung ist dabei mit der wasserbaulichen Fragestellung vergleichbar. Ziel ist es herauszufinden, wie beispielsweise die Erosion von Sohlenmaterial durch Vegetation beeinflusst wird. Dabei steht der Schutz von Landoberflächen in ariden oder semiariden Gebieten gegen flächige Erosion im Vordergrund.

Die verschiedenen hier vorgestellten Forschungsbereiche lassen bereits erkennen, dass Veröffentlichungen zum Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld, und insbesondere zum Widerstandsverhalten von Vegetation in der Literatur in einem fast unerschöpflichen Umfang vorhanden sind. Obwohl es nicht möglich gewesen ist, die gesamte Literatur zu sichten, wurde der Stand der Forschung zum Widerstandsverhalten von Vegetation und Ansätze der Parametrisierung anhand des Großteils der Veröffentlichungen zusammengefasst. Weitere Veröffentlichungen zum Widerstandsverhalten von Vegetation sind als Referenzenliste in CULLEN (2002) zusammengetragen worden. Weiterhin blieb im Rahmen dieser Literaturrecherche der Bereich der Fernerkundungsmaßnahmen (remote sensing) von Vegetation unberücksichtigt, da sich hieraus nicht notwendigerweise Parametrisierungsansätze ableiten lassen. Vielmehr eröffnet sich durch Fernerkundungsmaßnahmen die Möglichkeit geeignete Vegetationsparameter mit immer weiter steigender Genauigkeit großräumig aufzunehmen. Aktuelle Ergebnisse zur Rauheitsbestimmung komplexer Baumgeometrien durch terrestrische Laserabtastung (terrestrial laser scanning, TLS) sind in ANTONARAKIS ET AL. (2009) und ANTONARAKIS ET AL. (2010) zusammengefasst.

Im Folgenden ist der Stand der Forschung zum Widerstandsverhalten von starrer und flexibler Vegetation in Abschnitt 2.1 zusammengefasst. In Abschnitt 2.2 folgt der Stand der Forschung zum Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld und in Abschnitt 2.3 werden die Untersuchungsschwerpunkte beschrieben.

2.1 Widerstandsverhalten von Vegetation und Parametrisierungsansätze

Der Strömungswiderstand eines Elementes beliebiger Form und Größe setzt sich aus dem Widerstand induziert durch die Reibung an der Oberfläche des Elementes und den Druckunterschieden zwischen Vorder- und Rückseite des Elementes zusammen (HOERNER, 1965). Hierbei sind die Anteile des Reibungs- und Druckwiderstandes am Gesamtwiderstand des Elementes von der Form und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Weil die Quantifizierung der Anteile selbst bei Objekten einfacher Geometrie nur schwer zu bestimmen ist, wird in den meisten Fällen nicht zwischen Oberflächenreibung und Druckunterschieden differenziert. Unter Vernachlässigung des Zustandes sehr kleiner Reynoldszahlen, sind die Widerstandskräfte unter vielen Bedingungen überwiegend proportional zu den hydrodynamischen Drücken und der Fläche des angeströmten Körpers, dessen Formeinfluss mit einem Beiwert C_D beschrieben werden kann (HOERNER, 1965). Aus diesen Proportionalitätsbeziehungen ergibt sich die Widerstandskraft F_D eines Körpers in einem strömenden Fluid innerhalb des Gültigkeitsbereichs des hydrodynamischen Druckes zu:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A u_R^2 \quad (2.1)$$

Mit ρ = Dichte des Fluides, C_D = Widerstandsbeiwert, A = Referenzfläche des Körpers, u_R = Referenzströmungsgeschwindigkeit.

In Abhängigkeit des Anwendungsgebietes, der Definition der Referenzfläche A und der Referenzgeschwindigkeit u_R ergeben sich nach Gl. (2.1) unterschiedliche Widerstandsbeiwerte C_D , deren Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit nur unter Kenntnis der Randbedingungen zulässig ist. Bspw. kann der Widerstandsbeiwert bezogen werden auf die Liftkräfte eines Objektes C_L , Druckunterschiede C_P , Oberflächenreibung C_F , die frontal projizierte Fläche C_{DL} , die benetzte Oberfläche C_{DO} , die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m , die Anströmgeschwindigkeit oder die Strömungsgeschwindigkeit im ungestörten Fließquerschnitt. Diese Aufzählung soll die Bandbreite der möglichen Randbedingungen und die Abhängigkeit zwischen den Parametern in Gl. (2.1) verdeutlichen.

Bei der Untersuchung von Vegetationselementen unter der Anwendung von Gl. (2.1) kann zudem zwischen starren und flexiblen Elementen unterschieden werden. Da der Begriff Flexibilität wissenschaftlich nicht exakt definiert ist und sowohl von den Materialkonstanten, der Geometrie des Körpers und von der Größe der angreifenden Kraft abhängig ist, werden im folgenden Vegetationselemente, die ihre Form unter Einfluss der Strömungskräfte nicht verändern, als starr bezeichnet und Elemente die einer Formänderung unterliegen als flexibel.

2.1.1 Starre Vegetation

Starre Vegetationselemente treten natürlicherweise in Form von etablierten Baumbeständen auf, deren Stämme in hydraulischen Modellversuchen in der Form zylindrischer Stäbe simuliert werden. Unter Anwendung von Gl. (2.1) auf starre Vegetationselemente erhält man eine quadratische Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft F_D und der Referenzgeschwindigkeit u_R . Für u_R wird im Allgemeinen die querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit u_m verwendet und für A die frontal angeströmte Fläche A_p als Referenzfläche festgelegt. Eine quadratische Widerstandsbeziehung starrer Elemente wurde unter anderem von HOERNER (1965), XAVIER (2010), SCHONEBOOM ET AL. (2008), JAMES ET AL. (2001), CALLAGHAN ET AL. (2007) und COOPER ET AL. (2007) beschrieben. Unter Verwendung von Gl. (2.1) und der Definition einer Referenzfläche A und des zugehörigen Widerstandsbeiwertes C_D wird keine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Einflussgrößen vorgenommen. Der Widerstandsbeiwert beschreibt einen elementspezifischen und strömungssituationsbezogenen Gesamtbeiwert. Dieser dimensionslose Gesamtwiderstandsbeiwert ist also das Maß für die nicht näher quantifizierbaren Einflussgrößen auf die Widerstandskraft. Er kann durch Umformen von Gl. (2.1) wie folgt berechnet werden:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A u_R^2} \quad [-] \quad (2.2)$$

Diese Problematik, nicht zwischen unterschiedlichen Einflussgrößen auf den Widerstandsbeiwert unterscheiden zu können, ist insbesondere bei der Interpretation von Widerstandsbeiwerten flexibler Vegetation aber auch bei der Übertragbarkeit von Laborversuchen mit glatten Zylindern auf natürliche Vegetation mit hoher Oberflächenrauheit zu beachten. Neben der Oberflächenbeschaffenheit des untersuchten Elementes wirkt sich die Form bei gleicher frontal projizierter Fläche signifikant auf die Widerstandskraft aus (HOERNER 1965). Weiterhin schlagen sich auch Einflüsse des Verbauungsgrades (vgl. COOPER ET AL. 2007, RICHTER 1973) und strömungsinduzierte Schwingungen (z.B. SCHONEBOOM ET AL. 2008, SUMER & FREDSE 2006, CHEN 1985) des Elementes auf die Höhe des Widerstandsbeiwertes nieder.

Da der Widerstandsbeiwert neben den Elementeigenschaften auch von den Strömungseigenschaften und dem Turbulenzgrad der Strömung abhängig ist (CHEN 1985) und, um die Übertragbarkeit auf andere Strömungsverhältnisse herzustellen, kann eine auf das Objekt bezogene Reynoldszahl Re definiert werden:

$$Re = \frac{u_m l}{\nu} \quad (2.3)$$

Wobei l die charakteristische Länge des Elementes und ν die kinematische Viskosität des Fluides bezeichnen.

Ebenso wie C_D in Gl. (2.2) ist die Reynoldszahl in Gl. (2.3) abhängig von der Definition der charakteristischen Länge l , für die eine Vielzahl von Definitionen, insbesondere bei flexiblen und natürlichen Elementen, existieren.

Eine weit verbreitete Definition der Referenzlänge für starre Zylinder ist der Stammdurchmesser d . In Abb. 2.1 ist der Widerstandsbeiwert eines starren Zylinders in Abhängigkeit der objektbezogenen Reynoldszahl mit $l = d$ dargestellt und zeigt im Bereich von Reynoldszahlen zwischen $10^4 < Re_d < 2 \cdot 10^5$ näherungsweise konstante Werte für den Widerstandsbeiwert mit $C_D \approx 1,2$ und zwischen $10^3 < Re_d < 4 \cdot 10^3$ Werte mit $C_D \approx 1,0$. Für $Re_d > 2 \cdot 10^5$ fällt der Widerstandsbeiwert stark ab, was jedoch für den Großteil natürlicher Strömungssituationen in Bewuchsfeldern irrelevant ist. Im Allgemeinen wird daher ein C_D -Wert zwischen 1,0 und 1,2 angesetzt (siehe z.B. ROWINSKI & KUBRAK. (2002) für eine Parametrisierung von $C_D = f(Re_d)$). Widerstandsbeiwerte von Elementen deren Form und Oberflächenrauheit von Objekten abweichen, die in der Literatur verzeichnet sind, müssen aufgrund der formspezifischen Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes in Versuchen bestimmt werden.

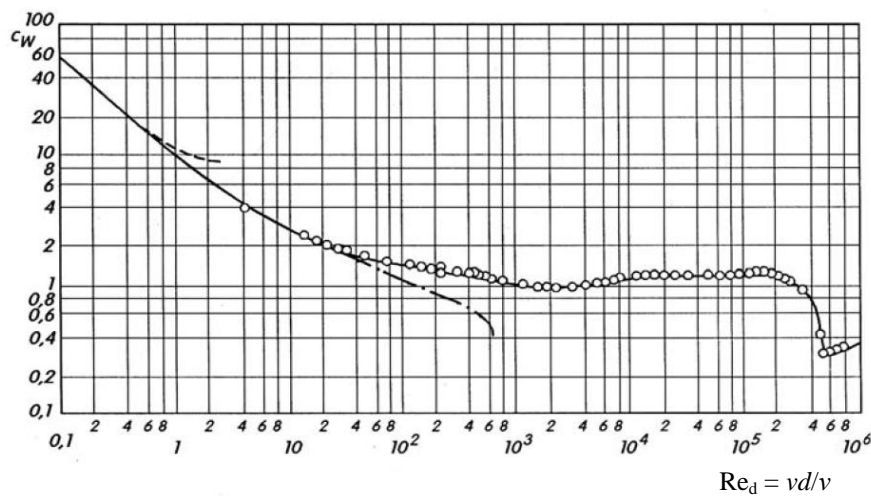


Abb. 2.1 Widerstandsbeiwert C_D (hier C_w) in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re_d für einen starren Zylinder (aus SCHLICHTING & GERSTEN 2006)

In Versuchen zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte von zylindrischen Elementen muss jedoch beachtet werden, dass ein mehr oder weniger elastisch eingespannter Kreiszylinder in einer turbulenten Strömung mit $Re_d > 40$ (SUMER & FREDSE 2006) erzwungene Schwingungen ausführt. Die Strömungsvorgänge am schwingenden Kreiszylinder sind sehr komplex und von einer Vielzahl von Randbedingungen abhängig (RICHTER, 1973). Der Ursprung der Schwingungen liegt in den alternierenden Wirbelablösungen infolge periodischer Änderungen der Druckverteilung ringsum den Zylinder. Diese periodische Änderung der Druckverteilung erzeugt eine periodisch mit der Zeit oszillierende Kraftkomponente quer zur Strömungsrichtung auf den Zylinder, die sogenannte Liftkraft F'_L , deren Mittelwert $\overline{F'_L}$ Null ist. In Strömungsrichtung, also in Richtung der Widerstandskraft, wirkt ebenfalls aufgrund der periodischen Wirbelablösungen eine periodisch oszillierende Kraftkomponente F'_D . Entsprechend dieser Aufteilung können Widerstandsbeiwerte der Liftkraft C'_L und der Widerstandskraft C'_D aus den Anteilen der oszillierenden Kraftkomponenten F'_L und F'_D , die aus Messungen gewonnen werden, berechnet werden (SUMER & FREDSE 2006):

$$F'_D = F_D - \overline{F_D} \quad (2.4)$$

$$F'_L = F_L - \overline{F_L} = F_L - 0 = F_L \quad (2.5)$$

Die oszillierenden Lift- und Widerstandskraftkomponenten eines elastisch gelagerten Zylinders sind dabei von zwei sich überlagernden und gegenseitig beeinflussenden Schwingungsvorgängen gekennzeichnet. Während der Zylinder bestrebt ist mit seiner Eigenfrequenz zu schwingen, wird dieser durch die periodische Wirbelablösung, die durch eine charakteristische, vom Turbulenzgrad der Strömung abhängende Länge gekennzeichnet ist, beeinflusst. Daraus resultiert eine Intensivierung des Schwingungsvorganges, wodurch sich die Amplitude verändern kann und es zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstandsbeiwertes C_D kommt. Wesentliche Einflussgrößen auf die Amplitude und die Frequenz der Schwingungen sind neben dem Turbulenzgrad der Strömung, der Oberflächenrauheit des Zylinders, dessen Masse und dem Verbauungsgrad, das dynamische Verhalten des Messsystems. Ungeachtet dieser zahlreichen Einflussfaktoren führen Schwingungen im Allgemeinen zu einer substantiellen Erhöhung des Widerstandsbeiwertes C_D gegenüber einem nichtschwingenden Zylinder, wobei der Widerstandsbeiwert eines oszillierenden Zylinders ein Vielfaches von dem eines festen Zylinders sein kann (CHEN 1985). Aufgrund einer hohen Schwankungsbreite der Messergebnisse unterschiedlicher Autoren schlägt CHEN (1985) den Gebrauch von $C'_L = 1,2$ und $C'_D = 0,2$ im gesamten Reynoldszahlenbereich Re_d vor.

2.1.2 Flexible Vegetation

Im Unterschied zum Widerstandsverhalten starrer Elemente, zeigen flexible Elemente aufgrund ihrer Verformung unter Strömungseinfluss ein differenziertes Widerstandsverhalten. In Abb. 2.2 ist ein flexibles Vegetationselement in der Seitenansicht bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass sich die Form der Pflanze mit steigender Strömungsgeschwindigkeit signifikant ändert. Neben einer Biegung des Stammes und der damit verbundenen Höhenkontraktion, findet eine signifikante Breitenkontraktion statt (nicht dargestellt). Diese Verformung wirkt sich auf das Widerstandsverhalten aus.

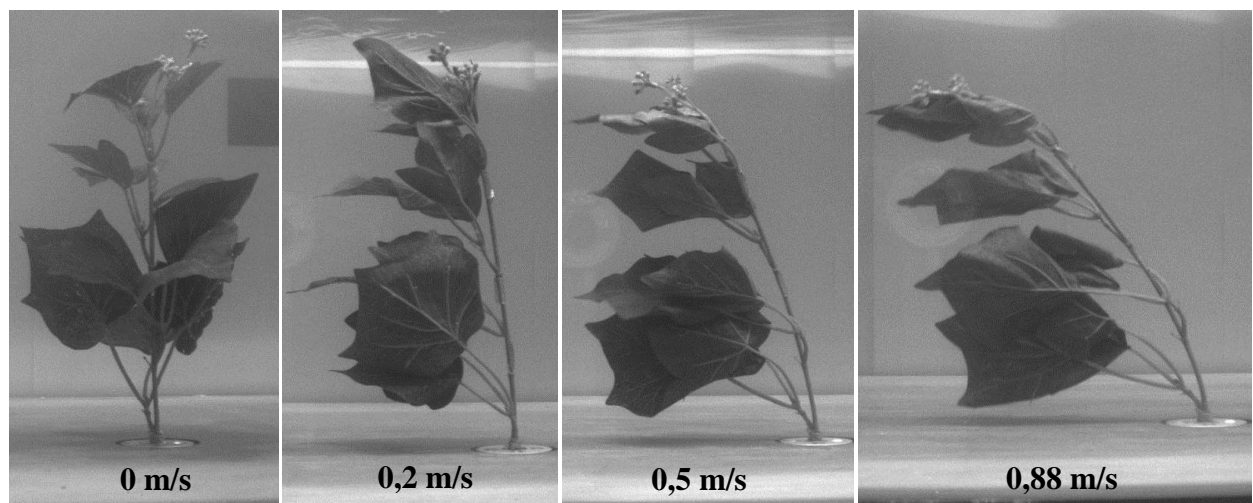


Abb. 2.2 Verformung eines flexiblen Vegetationselementes in der Seitenansicht

Der funktionale Zusammenhang zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit kann nach OPLATKA (1998) in drei Bereiche eingeteilt werden, die durch Übergangsbereiche überlagert werden. In Abb. 2.3 ist das Widerstandsverhalten flexibler Vegetationselemente schematisch dargestellt.

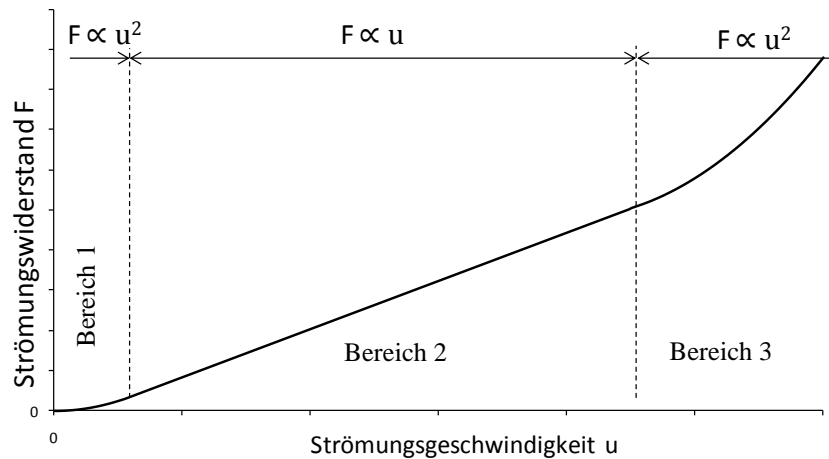


Abb. 2.3 Schematische Darstellung des Widerstandsverhaltens flexibler Vegetationselemente

In Bereich 1, bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten, führen die Strömungskräfte zu keiner, bzw. nur zu einer geringfügigen Verformung des Elementes und die Widerstandskraft ist proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Setzt eine Verformung infolge einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit ein, geht Bereich 1 in Bereich 2 über. In Bereich 2 ist die Verformung hoch und die Widerstandskraft ist näherungsweise proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Der Übergang von Bereich 1 in Bereich 2 wurde in WILSON ET AL. (2010) und XAVIER (2010) anhand von be- und entlaubten Weiden-, Erlen- und Pappelästen untersucht. Es wurde die Übergangsströmungsgeschwindigkeit bestimmt, die den Übergang von Bereich 1 zu Bereich 2 definiert. Es wurde deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit des Überganges zwischen Bereich 1 und 2 von den Materialeigenschaften der Vegetationselemente abhängig ist. Weiterhin wurden unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten des Übergangsbereichs im be- und entlaubten Zustand bestimmt, wobei jedoch keine konsistenten Ergebnisse erzielt wurden. Außerdem konnten keine quantitativen Zusammenhänge zwischen der Übergangsgeschwindigkeit und den Vegetationsparametern abgeleitet werden. Im Mittel wurde die Übergangsgeschwindigkeit für die Weiden zu 0,35 m/s, für die Erlen zu 0,65 m/s und für die Pappeln zu 0,47 m/s im entlaubten Fall bestimmt. Auch FRASER (1962) zeigte in eigenen Versuchen bei denen die Widerstandskräfte von Nadelbäumen im Windkanal gemessen wurden, dass die Strömungsgeschwindigkeit erst ab einer gewissen Geschwindigkeit linear mit der Strömungsgeschwindigkeit anstieg. Bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten verhielten sich die Pflanzen nahezu steif. Ähnliche Beobachtungen wurden in SPECK (2003) für eine Schilfart (*Arundo donax*) gemacht.

In Bereich 2 ist die Verformung des Elementes aufgrund der Flexibilität hoch und die Strömungskräfte verhalten sich proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. In diesem Bereich findet eine Höhen- und Breitenkontraktion des Vegetationselementes statt. OPLATKA (1998) untersuchte

Weidenbäume und stellte eine Kontraktion von bis zu 65-85% in der Breite und 80-90% in der Höhe bei Strömungsgeschwindigkeiten von 4 m/s fest. WEISSTEINER (2009) ermittelte eine Höhenreduktion von Weidenbäumen um bis zu 90% bei 4 m/s und zwischen 55-80% bei 2 m/s, was im Bereich der durch OPLATKA (1998) gemessenen Werte liegt.

Der Übergang von Bereich 2 zu Bereich 3 ist variabel und hängt von den Vegetationsparametern ab. Nach OPLATKA (1998) und FREEMAN ET AL. (2000) verhält sich die Pflanze in Bereich 3 wie ein starres Element nachdem sie einen Zustand maximaler Kompression eingenommen hat und sich nicht weiter verformt. Dies konnte jedoch in den Versuchen von OPLATKA (1998) bei Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4 m/s und eigenen Versuchen mit Weiden bis zu Strömungsgeschwindigkeiten von 6 m/s nicht beobachtet werden (Versuchsergebnisse siehe XAVIER 2010). Weil sich der Übergang von Bereich 2 zu Bereich 3 im Bereich sehr hoher Fließgeschwindigkeiten befindet, die auch im Hochwasserfall kaum erreicht werden, kann im Allgemeinen eine lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit angenommen werden (OPLATKA 1998).

Versuche mit natürlichen Vegetationselementen (u.a. FRASER 1962, FATHI-MAGHADAM 1996, OPLATKA 1998, FREEMAN ET AL. 2000, RUDNICKI ET AL. 2004, VOLLSINGER ET AL. 2005, ARMANINI ET AL. 2005, KANE & SMILEY 2006, KANE ET AL. 2008, WILSON ET AL. 2005, 2008 und anderen) aber auch mit künstlichen flexiblen Vegetationselementen (HARDER ET AL. 2004, SCHONEBOOM ET AL. 2008) zeigten, unabhängig von der Form und der Größe der Elemente, ebenfalls eine nahezu lineare Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Strömungsgeschwindigkeit in Bereich 2. Bei vereinzelt Elementen (vgl. XAVIER 2010) wurde hingegen ein abweichendes Verhalten festgestellt, das jedoch nicht näher erklärt werden konnte.

Die Parametrisierung der Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung flexibler Vegetation kann mit Hilfe von Gl. (2.1) erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich aufgrund der Flexibilität unter anderem auch die Form der Pflanze und die Porosität verändert. Die Porosität ist als das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen definiert. ISHIKAWA ET AL. (2006) stellten fest, dass die Flexibilität und die Porosität einen großen Einfluss auf die Widerstandseigenschaften haben. GRANT & NICKLING (1998) untersuchten den Einfluss der Porosität auf den Widerstandsbeiwert an einem künstlichen Weihnachtsbaum in einer Luftströmung im Feld. Sie fanden heraus, dass die optische Porosität als Potenz-Funktion der volumetrischen Porosität ansteigt, wobei zu beachten ist, dass bei unregelmäßigen natürlichen Objekten die Abhängigkeit zwischen optischer und volumetrischer Porosität eine komplexe Funktion zwischen Struktur und Tiefe des Elementes ist. Der Widerstandsbeiwert stieg zunächst mit steigender Porosität an und erreichte den Scheitelpunkt bei mittlerer Porosität. Danach sank der Widerstandsbeiwert.

Die Auswirkungen der Flexibilität auf die Referenzfläche A führen zu besonderen Problemen bei der Berechnung des C_D -Wertes (RUDNICKI ET AL. 2004). Zur Beantwortung der Frage nach der Wahl einer geeigneten Referenzfläche gab VOGEL (1994) an, dass für stromlinienförmige Objekte bei hohen Reynoldszahlen, wenn also die Widerstandskraft hauptsächlich aus den dynamischen Druckunterschieden entsteht, sich die frontal projizierte Fläche am besten eignet. Diese ist in Laboruntersuchungen bspw. durch die Verwendung von Unterwasserkameras (SCHONEBOOM ET AL.

2009) oder durch eine fotografische Aufnahme durch die Wasseroberfläche unter Verwendung eines Spiegels (STATZNER ET AL. 2006, SAGNES 2010) bestimmbar, wobei SAGNES (2010) Abweichungen der frontal projizierten Flächen um bis zu 20% unter Anwendung mehrerer Skalen ermittelte. Weitere Einflussgrößen wie die Porosität, die Biegesteifigkeit und der Oberflächenwiderstand bleiben bei der frontal projizierten Fläche jedoch unberücksichtigt. Außerdem stellt die stromlinienförmige Verformung der Pflanzen technisch eine Erhöhung des Anteils der Oberflächenreibung im Vergleich mit dem Druckwiderstand dar (CULLEN 2002). Weiterhin ist die Bestimmung der frontal projizierten Fläche in der Natur, während eines Hochwasserereignisses extrem schwierig und es ist bislang nicht gelungen die frontal projizierte Fläche einer Pflanze unter Strömungseinfluss zu prognostizieren. Weitere Definitionen der Referenzfläche wurden in der Literatur vorgeschlagen, wie bspw. die Pflanzenhöhe, die benetzte Fläche der Pflanze, der Durchmesser des Hauptstammes und andere. Letztere drei wurden in STATZNER ET AL. (2006) in Kombination mit unterschiedlichen Definitionen der Referenzströmungsgeschwindigkeit in Bezug auf die Auswirkungen und Interpretierbarkeit der resultierenden Widerstandsbeiwerte C_D anhand von Makrophyten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die C_D -Werte in Abhängigkeit der gewählten Definition gegensätzlichen Trends folgen und sich um bis zu zwei Größenordnungen unterscheiden können. Dies gilt gleichermaßen für die Verwendung und Interpretation der objektbezogenen Reynoldszahl, die ebenso wie der Widerstandsbeiwert von der Definition der Referenzlänge abhängig ist. Auch JAMES ET AL. (2008) weisen darauf hin, dass der Stammdurchmesser d als charakteristisches Längenmaß für Elemente mit komplexen Formen ungeeignet ist. In Studien, in denen keine Informationen über die angeströmte Fläche vorliegen, werden der Widerstandsbeiwert und die Fläche für gewöhnlich kombiniert als $C_D A_P$ Parameter betrachtet (z.B. OPLATKA 1998). Da die Größe von $C_D A_P$ von den Vegetationsparametern abhängt, ist er für eine allgemeine Parametrisierung der Vegetation ungeeignet (ABERLE ET AL. 2010b). Weiterhin ist die Definition einer konstanten Referenzfläche, bspw. der frontalen Fläche der Äste ohne die Berücksichtigung des Laubes, nicht nützlich, weil dadurch der Widerstandsbeiwert eine Funktion der charakteristischen Fläche wird und seine Universalität als formbezogener Beiwert verliert (ARMANINI ET AL. 2009). In der kürzlich geführten Diskussion von ARMANINI ET AL. (2009) auf Grundlage der Versuchsergebnisse von ARMANINI ET AL. (2005) wird die Notwendigkeit der Wahl geeigneter charakteristischer Längenmaßstäbe betont. Anstelle des Hauptstammdurchmessers wird vorgeschlagen einen charakteristischen Stammdurchmesser zu verwenden. Für die Ermittlung des charakteristischen Stammdurchmessers wurde in JÄRVELÄ (2004) ein Verfahren vorgeschlagen, welches auf der Selbstähnlichkeitstheorie von MCMAHON & KRONAUER (1976) basiert (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Letztendlich bleibt jedoch offen, ob der charakteristische Stammdurchmesser ein geeignetes Maß darstellt.

Die Ausführungen machen deutlich, dass es notwendig ist die Vegetationselemente über ihre vegetationsspezifischen Eigenschaften zu parametrisieren und diese in Verbindung mit dem Widerstandsverhalten zu bringen. Nur so kann eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden und eine Prognose des Vegetationswiderstandes erfolgen. Dabei ist zu bedenken, dass die Eigenschaften natürlicher Vegetation selbst innerhalb einer Spezies

erheblichen Schwankungen unterliegen, da diese im hohen Maße unter anderem von Standortfaktoren beeinflusst werden.

2.1.2.1 Parametrisierungsansätze

Untersuchungen, in denen eine Parametrisierung der Vegetationselemente mit dem Ziel einer besseren Beschreibung des Widerstandsverhaltens flexibler Vegetation vorgenommen wurden, sind unter anderem diejenigen von RUDNICKI ET AL. (2004), VOLLSINGER ET AL. (2005), KANE & SMILEY (2006), SMILEY & KANE (2006), KANE ET AL. (2008), XAVIER (2010) und WILSON ET AL. (2010).

Die wohl umfangreichsten kürzlich veröffentlichten Versuchsergebnisse mit natürlicher Vegetation in einem Windkanal sind in VOLLSINGER ET AL. (2005) und RUDNICKI ET AL. (2004) beschrieben. In VOLLSINGER ET AL. (2005) wurden die Widerstandskräfte von jeweils zehn jungen nordamerikanischen Laubbäumen der Arten Schwarzpappel, Erle und Birke bei Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 20 m/s gemessen. Die Laubbäume waren frei gewachsenen, 3-5 m hoch und hatten einen symmetrischen Aufbau. RUDNICKI ET AL. (2004) untersuchten in derselben Versuchseinrichtung unter vergleichbaren Bedingungen die Strömungskräfte auf drei nordamerikanische Fichtenarten. Die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung und Analyse der Ergebnisse war zwischen den Untersuchungen vergleichbar. Es wurden die Widerstandskräfte und die frontal projizierte Fläche den Massenanteilen der Äste, der Krone und dem Laub gegenübergestellt. RUDNICKI ET AL. (2004) und VOLLSINGER ET AL. (2005) erhielten eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft und dem Produkt aus der Astmasse (incl. Blattmasse) und der Strömungsgeschwindigkeit für jede der untersuchten Pflanzenart. Zudem wurde ebenfalls, und zwar mit höherer Genauigkeit, eine lineare Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft und der frontal projizierten Fläche festgestellt. Erstere Abhängigkeit wurde in VOLLSINGER ET AL. (2005) durch Teilversuche, bei denen einzelne Äste vom Hauptstamm entfernt wurden, bestätigt. Auch in SMILEY & KANE (2006), die den Einfluss unterschiedlicher Arten der Ausdünnung auf die Widerstandskräfte von 81 Rotahornbäumen untersuchten, wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und der Masse der Bäume festgestellt. Weiterhin wurde dieser Zusammenhang in KANE & SMILEY (2006) und KANE ET AL. (2008) ebenfalls für Laubbäume bestätigt. In XAVIER (2010) wurde die höchste Übereinstimmung mit der Trockenmasse der Bäume, bzw. des Verdrängungsvolumens (die ebenfalls eng miteinander korrelierten) ermittelt. VOLLSINGER ET AL. (2005) stellten fest, dass die Kraft pro Astmasse abhängig von der Pflanzenart war, jedoch wurde die Variation nicht auf eine systematische Variation der Blattgröße zurückgeführt. Weiterhin stellten VOLLSINGER ET AL. (2005) fest, dass bei den untersuchten relativ kleinen Baumgrößen die Interferenz zwischen den einzelnen Ästen eines Baumes minimal ist und, dass die Äste sich unabhängig voneinander als Widerstandselemente verhalten.

Einfluss der Flexibilität

Die Quantifizierung der Flexibilität von Pflanzen anhand von pflanzenspezifischen Materialeigenschaften wurde in VOLLINGER & DOPPLER (2000) durchgeführt. In den Versuchen wurde der Elastizitätsmodul E von 25 Weiden mit Stammdurchmessern zwischen 0,5 und 1,0 cm bestimmt. Dabei wurden die Stämme bis zum Bruch deformiert. Es wurde ein elasto-plastisches Materialverhalten mit einem sehr langen Übergangsbereich beobachtet und kein rein linear-elastisches Materialverhalten. Bei allen getesteten Bäumen überwog der plastische Verformungsanteil deutlich gegenüber dem elastischen. Dabei muss angemerkt werden, dass die Versuche durchgeführt wurden, um den Mechanismus der Abdeckung des Bodens durch flexible, sich umlegende Uferpflanzen zu beschreiben, und daher nur Stämme in Bodennähe untersucht worden sind. Bei der Beschreibung des flexiblen Verhaltens des gesamten Vegetationselementes ist jedoch zu beachten, dass die Flexibilität der Äste nach außen hin steigt, wohingegen die inneren, älteren Äste eine geringere Flexibilität aufweisen (BERTRAM 1989). Weiterhin stellt der E -Modul als Parameter zur Quantifizierung der Biegesteifigkeit eines Baumes keine universale artspezifische Materialkonstante dar, da E im hohen Maße vom Alter der Pflanze und äußeren Einflüssen abhängig ist. Dabei spielen die Nährstoffversorgung, Belastungen durch Wind- und Schwerkraft (Bildung von Reaktionsholz) sowie das Wachstumsverhalten unter dem Einfluss des Konkurrenzkampfes innerhalb eines Bewuchsfeldes eine signifikante Rolle (PRETZSCH 2010). Auch NIKLAS (1999) merkte an, dass sich biologische Strukturen nur selten oder niemals wie linear elastische isotrope Materialien verhalten. Versuche von XAVIER (2010), die Widerstandskräfte in Abhängigkeit eines mittleren Elastizitätsmoduls zu untersuchen, führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Im Allgemeinen wurde eine starke Streuung des E -Moduls festgestellt, die auf die oben genannten Abhängigkeiten zurückzuführen ist. Weiterhin steigt der E -Modul mit größer werdendem Durchmesser, da durch die Verholzung die Biegesteifigkeit zunimmt (OPLATKA, 1998). KOUWEN & FATHIMOOGHADAM (2000) führten zur Berücksichtigung der Flexibilität einen artspezifischen Vegetationsindex ζE ein, der für eine Vegetationsart konstant ist und die Flexibilität, Form und Biomasse der Vegetationselemente berücksichtigt. Werte für den Vegetationsindex werden aus Versuchen gewonnen, bei denen die Eigenfrequenz der Pflanze gemessen wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Auch FREEMAN ET AL. (2000) erachten die Biegesteifigkeit als einen wesentlichen Parameter zur Berücksichtigung der Flexibilität und schlagen ein eigenes Verfahren vor, bei dem in Höhe des Zentrums der Blattmasse eine so hohe Kraft auf die Pflanze aufgebracht wird, dass sie sich um einen Winkel von 45 Grad neigt. Mit der ermittelten Widerstandskraft wird dann zusammen mit weiteren geometrischen Pflanzeninformationen der Elastizitätsmodul berechnet (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).

Für andere Vegetationsarten, wie bspw. Schilf, stellten KUTJA & HONG (1996) ein numerisches Modell vor, um die Biegung der Pflanzen zu bestimmen, welches die Flexibilität durch die Biegesteifigkeit berücksichtigt. Hierbei ist jedoch anzunehmen, dass sich die Biegesteifigkeit von Schilf nicht wesentlich über die Pflanzenhöhe ändert.

Einfluss der Blätter

Im Vergleich zu den hölzernen Pflanzenteilen, weist das Laub im Allgemeinen eine wesentlich höhere Flexibilität auf. Daher kann eine strömungsgünstige Verformung bereits bei Strömungsgeschwindigkeiten einsetzen, bei denen sich die hölzernen Teile noch nahezu starr verhalten. In Abhängigkeit der Pflanzenform kann die strömungsgünstige Verformung zu einem Großteil abgeschlossen sein, wenn eine nennenswerte Verformung der hölzernen Teile erst beginnt. Weil die Verformung des Laubes artspezifisch ist, kann es zu deutlichen Unterschieden zwischen Blättern und Nadeln kommen (vgl. VOLLSINGER ET AL. 2005, WILSON ET AL. 2008). Detaillierte Untersuchungen des Widerstandsverhaltens einzelner Blätter und Cluster von Blättern durch VOGEL (1984, 1989) führten zu dem Ergebnis, dass eine höhere Flexibilität nicht automatisch zu einem geringeren Widerstand führt. Stattdessen ist mit der Flexibilität ein spezifisches adaptives Design verbunden. In Abhängigkeit der Form, der Flexibilität und der Anordnung der Blätter an einem Ast unterscheidet sich das Verhalten unterschiedlicher Arten in Strömungen deutlich. Weiterhin wirken, bezogen auf die Blattfläche, auf einzelne Blätter höhere Widerstandskräfte als auf Cluster und auf Blätter mit einer einfachen Form geringere Kräfte als auf Blätter mit komplexeren Formen. Letzteres wurde in den Untersuchungen von ALBAYRAK ET AL. (2010) bestätigt. ALBAYRAK ET AL. (2010) untersuchten den Einfluss der Flexibilität und der Blattform auf die Widerstandskraft anhand von drei künstlichen Blättern und stellten fest, dass das Blatt mit der komplexesten Geometrie den höchsten Widerstand hat und, dass Blätter mit steigender Flexibilität eine geringere Widerstandskraft bei gleicher Form aufnehmen. Die Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung von Blättern mit einfachen und komplizierten Blattformen oder kleinen Clustern unterschied sich in den Messungen von VOGEL (1989) nur durch geringfügig höhere Exponenten a der Widerstandsbeziehung $F_D \propto u^a$, mit a zwischen 1 und 1,22 (VOGEL 2009). Zum Vergleich der Widerstandskräfte in Abhängigkeit des Laubes schlugen NIKLAS (1999) und VOGEL (2009) die einseitige Blattfläche als Referenzfläche für Gl. (2.1) vor, da sich in Messungen zeigte, dass die Widerstandskraft eines Blattes proportional zur Blattoberfläche ist.

Der Großteil der Untersuchungen, die sich mit dem Einfluss von Laub auf die Widerstandskraft von flexiblen Vegetationselementen beschäftigten, fokussierten ihre Analysen auf den Unterschied zwischen vollständig be- und entlaubten Pflanzenelementen (vgl. FISCHENICH 1996, FREEMAN ET AL. 2000, RUDNICKI ET AL. 2004, ARMANINI ET AL. 2005, VOLLSINGER ET AL. 2005, SMILEY & KANE 2006, XAVIER ET AL. 2010 und andere). Die Versuche zeigten, dass Laub signifikant zum Gesamtwiderstand eines Baumes beitragen kann, wobei jedoch der Anteil am Gesamtwiderstand zwischen den Untersuchungen stark variiert. In den Untersuchungen von JAMES ET AL. (2004) wurde der Einfluss einer schrittweisen Entlaubung und zwar einer Schilfart gemessen. Jedoch wurde der Einfluss einer reduzierten Blattfläche auf die Widerstandskraft nicht weiter untersucht. JÄRVELÄ (2002) führte Messungen mit Weiden im be- und entlaubten Zustand in einem Bewuchsfeld durch, jedoch ohne die Widerstandskräfte anhand von Kraftmessungen zu bestimmen.

ARMANINI ET AL. (2005) führten unter anderem Kraftmessungen an einer „kleinen Weide“ bei einer relativen Überströmungshöhe $h/H=0,78$ durch, wobei h die Wassertiefe und H die geneigte

Pflanzenhöhe bezeichnet. Der Anteil des Laubes am Gesamtwiderstand war unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit (gezeigt in WILSON ET AL. 2008 anhand der Daten von ARMANINI ET AL. 2005), jedoch wurde eine quadratische Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Das Verhältnis der Widerstandskräfte von Pflanzen im belaubten und entlaubten Zustand wurde genauer in WILSON ET AL. (2008) untersucht. Es wurde die Widerstandskraft auf jeweils zwei Pinien und Efeuzweige mit einer Höhe von 20 cm gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss des Laubes des Efeus auf die Widerstandskraft nur geringfügig abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit war. Weiterhin wurde festgestellt, dass flexibles Laub den Widerstand signifikant reduzieren kann und sie folgerten, dass der Widerstand einer flexiblen Pflanze mit einem beträchtlichen Anteil Laub geringer sein kann als von einer weniger flexiblen Pflanze mit wenig Laub. Sie stellten außerdem fest, dass das Verhältnis der Widerstandskräfte zwischen belaubtem und entlaubtem Efeu mit steigender Fließgeschwindigkeit auf einem konstanten Wert zustrebt, wobei das Verhältnis für den Pinienzweig mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sank.

Die Versuche von VOLLSINGER ET AL. (2005) mit Bäumen im be- und entlaubten Zustand zeigten, dass bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s das Laub für ca. 57% der Gesamtwiderstandskraft bei der Schwarzpappel und 45% bei der Erle verantwortlich ist. Es wurde jedoch keine Korrelation zwischen der individuellen Blattmasse der Bäume und den Widerstandskräften gefunden. Die Widerstandskraft pro frontal projizierter Fläche bei belaubten Bäumen war höher als bei ihren unbelaubten Gegenstücken was zu der Aussage führte, dass sich das Laub selbst bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten nicht so stark stromlinienförmig verformt wie man annehmen könnte. Obwohl unbestritten ist, dass Laub einen signifikanten Einfluss auf die Widerstandskräfte von Vegetation hat und im Vergleich zu den Stämmen und Ästen eine wesentlich höhere Flexibilität aufweist, konnte bislang kein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen den Laubeigenschaften und den Widerstandskräften hergestellt werden. Auch die Untersuchungen von XAVIER (2010) zur Abhängigkeit zwischen der Blattmasse und der Widerstandskraft führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen.

2.1.2.2 Einfluss der relativen Fließtiefe h/H und der vertikalen Verteilung der angeströmten Pflanzenteile

Ist die relative Fließtiefe $h/H < 1$, werden die Vegetationselemente umströmt, wodurch sich ein stark vom Widerstandsverhalten bei $h/H \geq 1$ abweichendes Verhalten ergeben kann. Dies ist insbesondere vom strukturellen Aufbau der Pflanze, also der vertikalen Verteilung der angeströmten Pflanzenteile, und der Flexibilität der Vegetationselemente abhängig.

Die Versuchsergebnisse verschiedener Autoren zeigten, dass mit steigender Fließtiefe h und konstanter Strömungsgeschwindigkeit u_m ein linearer Zusammenhang zwischen Vegetationswiderstand und relativer Fließtiefe h/H besteht (JÄRVELÄ 2002, 2006; KOUWEN & FATHI-MAGHADAM 2000), falls die vertikale Verteilung der angeströmten Pflanzenteile konstant ist. Wird die Strö-

mungsgeschwindigkeit hingegen bei konstanter Fließtiefe variiert (z.B. OPLATKA 1998, ARMANINI ET AL. 2005), kommt es bei flexiblen Elementen zu einer Verformung, wodurch weitere Pflanzenteile unter die Wasserspiegeloberfläche gedrückt werden. Dadurch erhöht sich die Widerstandskraft bis die gesamte Pflanze überströmt ist.

ARMANINI ET AL. (2005) beobachteten bei einer relativen Überströmungshöhe $h/H = 0,78$ eine quadratische Widerstandsbeziehung. OPLATKA (1998) kam zu ähnlichen Ergebnissen, wobei er eine Abhängigkeit mit $F_D \sim u^a$, im Bereich $1 < a < 2$ und Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und ~ 2 m/s angab. Auch JÄRVELÄ (2006) beobachtete bei flexibler Vegetation eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Vegetationswiderstand und der Fließgeschwindigkeit bei variierender relativer Fließtiefe. Bei starrer Vegetation konnte bei einer gleichmäßigen Verteilung der vertikalen Blattfläche hingegen keine Abhängigkeit festgestellt werden (JÄRVELÄ 2002).

Eine ungleichmäßige vertikale Verteilung der angeströmten Pflanzenteile beschreiben bspw. WILSON ET AL. (2006) und ANTONARAKIS ET AL. (2009). WILSON ET AL. (2006) identifizierten drei Bereiche der vertikalen Verteilung der kumulativen angeströmten Fläche einer Weide. Während innerhalb jeder der Bereiche (Stamm, Hauptzone und Spitzenbereich) die Abhängigkeit zwischen Pflanzenhöhe und kumulativer frontal angeströmter Fläche durch eine lineare Regression angenähert werden konnte, wurde festgestellt, dass die Verteilung über die gesamte Pflanzenhöhe nicht linear ist. WILSON ET AL. (2006) merkten deshalb an, dass die charakteristische Verteilung der angeströmten Fläche nicht ignoriert werden darf. ANTONARAKIS ET AL. (2009) zeigten in diesem Zusammenhang anhand terrestrischer Laser-Scans für drei Pappelbestände, dass die Blattfläche stark über die Pflanzenhöhe variiert.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass FISCHENICH (1996) und FREEMAN ET AL. (2000) einen signifikanten Einfluss der Pflanzenmorphologie auf die Geschwindigkeitsverteilung beschreiben (vgl. Abb. 2.4). Die Autoren beobachteten, dass bei Büschen und Bäumen ohne Äste und Laub in Bodennähe ein signifikanter Anteil der Strömung in diesen offenen Bereichen abgeführt wird, was zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und einer Erhöhung der Sohlenschubspannung führen kann (vgl. auch BÖLSCHER ET AL. 2005). Quantitative Untersuchungen wurden jedoch nicht durchgeführt.

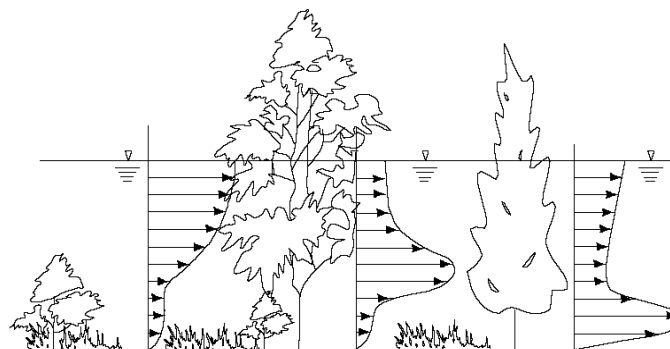


Abb. 2.4 Qualitative Geschwindigkeitsverteilung für überströmte und verschiedene durchströmte Vegetationsarten aus FISCHENICH (2000)

2.1.2.3 Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen: Skalierung und künstliche Vegetation

Ein wesentlicher Aspekt bei Laborversuchen ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine natürliche Umgebung. Bei der Untersuchung des Widerstandsverhaltens flexibler Vegetationselemente ist in dieser Arbeit die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Versuchen mit Pflanzen geringer Höhe, die sich auf Untersuchungen mit Zweigen beschränken, auf natürliche Bedingungen, gemeint. Während für die Hydraulik Skalierungsgesetze vorhanden sind, gibt es für natürliche Vegetation keinerlei Ansätze in der Literatur. KANE ET AL. (2008) bemerkten in diesem Zusammenhang, dass die Übertragbarkeit von C_D -Werten und Holzeigenschaften von kleinen Bäumen auf große Bäume prekär ist. Der Versuch von KANE & SMILEY (2006) die Kronenform mit einfachen geometrischen Formen nachzubilden, führte zu keinen guten Ergebnissen.

Zudem ist zu beachten, dass Laboruntersuchungen in der Regel einen hohen zeitlichen Aufwand erfordern, wenn Auswirkung unter dem Einfluss unterschiedlicher Parametervariationen untersucht werden sollen. Innerhalb der Untersuchungen sollten die nicht variierten Randbedingungen, hier die Vegetationseigenschaften, idealerweise konstant sein. Bei natürlichen Vegetationsteilen verändern sich die Vegetationseigenschaften, sobald diese von der Nährstoffversorgung getrennt werden. VÄSTILÄ ET AL. (2011) bezogen Unterschiede der Versuchsergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit den gleichen Vegetationselementen auf eine potenzielle Veränderung der Vegetationseigenschaften. OPLATKA (1998) betonte, dass der Beschnitt der Pflanzen und die Versuche am selben Tag durchgeführt worden sind, um sicherzustellen, dass sich die Vegetationseigenschaften nicht ändern.

Um Versuche über einen längeren Zeitraum und unter konstanten vegetationsspezifischen Randbedingungen durchführen zu können, ist es notwendig, natürliche Pflanzen durch künstliche Vegetationselemente zu ersetzen. JÄRVELÄ (2006) untersuchte das Widerstandsverhalten einer künstlichen Seggenart in einem Bewuchsfeld und stellte ein von natürlichen Elementen signifikant abweichendes Widerstandsverhalten fest. Er folgerte, dass künstliche Vegetationselemente nicht notwendigerweise ein ähnliches Widerstandsverhalten aufweisen müssen wie ihre natürlichen Gegenstücke. Weitere Hinweise über die Vergleichbarkeit zwischen natürlichen und künstlichen Vegetationselementen und über die Durchführung von Messungen zur Überprüfung der Eignung von künstlichen Vegetationselementen konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

2.1.3 Allometrische Beziehungen natürlicher Vegetation

Ein bislang, insbesondere im Wasserbau, nur wenig beachteter Weg der Identifizierung potenziell geeigneter Vegetationsparameter zur Beschreibung des Widerstandsverhaltens ist die Anwendung allometrischer Beziehungen zwischen den Vegetationsparametern. Allometrische Beziehungen stellen die Größe eines Körpers in Bezug zu verschiedensten biologischen Größen dar und werden u.a. in der Biologie aber auch in der Forstwirtschaft angewendet. Eine bekannte Beziehung ist das allometrische Wachstum, eine Bezeichnung für das Phänomen das sich während des Wachstums die

Körperproportionen infolge unterschiedlicher Wachstumsgeschwindigkeiten von Körperteilen verändern.

Bei der Untersuchung allometrischer Beziehungen steht die allgemeine Annahme im Vordergrund, dass ein Baum eine effiziente Struktur ist, wobei die Form der Strukturen eng mit den Anforderungen, welche aus den äußeren Einflüssen resultieren, verknüpft ist (BERTRAM 1989). Folglich ändern sich die Proportionen von Ästen während des Wachstums aufgrund der sich ändernden Anforderungen. Die hölzernen Teile eines Baumes erfüllen mehrere Funktionen, wobei bei jungen Trieben, bei denen das zu tragende Gewicht des Laubes relativ gering ist, die Versorgungsfunktion der Blätter im Vordergrund steht und der hölzerne Teil schlank ist. Mit steigendem Alter des Astes und höheren mechanischen Belastungen verringert sich der Anteil der versorgenden Holzteile und die tragende Funktion rückt in den Vordergrund. BERTRAM (1989) schlug daher ein differentielles Skalierungsmodell für hölzerne Pflanzen vor, bei dem die Pflanzenteile unterhalb einer kritischen Größe mit einer anderen allometrischen Beziehung skaliert werden, da sie sich beim wachsen verschlanken. Oberhalb dieser Grenze werden die Pflanzenteile eher robuster, wenn die Größe wächst. Diese Verschlinkung und die eher robuste Entwicklung macht es so schwierig Ergebnisse, die mit kleinen Pflanzenteilen gewonnen wurden, auf große Pflanzen zu übertragen.

Viele der Beziehungen zwischen Körpergrößen und biologischen Parametern lassen sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$Y = bX^a \quad (2.6)$$

Wobei X und Y morphologische Variablen sind, a den Allometrieexponenten darstellt und b die relativen Abhängigkeiten zwischen X und Y beschreibt.

Bezüglich der mechanischen und biologischen Effektivität gibt es eine Vielzahl funktionaler Aspekte bei Bäumen die durch die Länge und den Durchmesser der Äste beeinflusst werden (BERTRAM 1989). Beispielsweise besteht zwischen dem Astdurchmesser und der Blattfläche eine Beziehung, da für die Nährstoffversorgung eine bestimmte Querschnittsfläche an Splintholz benötigt wird. RUDNICKI ET AL. (2004) bringen bspw. die Kronenmasse eines Baumes in Verbindung mit der Splintholzfläche. BARTELINK (1997) bestätigt in seinen Untersuchungen die bekannte Proportionalitätsbeziehung zwischen dbh (Stammdurchmesser d in Brusthöhe: 1,30m) und Baumhöhe h_{tree} mit einem Exponenten a zwischen 1,5-2 ($dbh \propto h_{tree}^a$). Zu dem gleichen Ergebnis kam ENNOS (1999) für $a = 1,5$. Das bedeutet, dass große Bäume relativ gesehen dickere Stämme besitzen müssen als kleine Bäume. Dies führt dazu, dass junge Bäume relativ einfach vollständig umbiegen können und sich dadurch ihre Höhe und Widerstandskraft reduziert ohne dass sie abbrechen oder ausgerissen werden. Der Stammdurchmesser gilt daher als Indikator für die Baumbiomasse.

Die Blattfläche ist für gewöhnlich am Ende der Äste konzentriert, um die Aufnahme der Sonnenstrahlen zu optimieren. Daher wird in Abhängigkeit der Größe des Baumes eine bestimmte Menge Astmaterial benötigt, um eine bestimmte Menge an Blättern zu tragen. Vor diesem Hintergrund bestimmen ENQUIST & NIKLAS (2002) die Proportionalität zwischen Blattmasse M_L und Stammmasse M_S zu $M_L \propto M_S^{3/4}$. PRETZSCH & METTE (2008) beschreiben eine allometrische Beziehung

zwischen Stammdurchmesser und Laubbiomasse. Weiterhin besteht eine Proportionalität zwischen Blattbiomasse und Blattfläche auf Baumebene (BARTELINK 1997) und auf Blattebene (NIKLAS 1999).

In Bezug auf die Problematik der Beschreibung eines alternden und damit seine für das Widerstandsverhalten bedeutsame Parameter verändernden Baumbestandes gibt es einen weiteren Hinweis aus forstwirtschaftlichen Untersuchungen. PRETZSCH (2000) beschreibt das Bestandsdichtegesetz von REINEKE (1933), welches einen allometrischen Zusammenhang zwischen dem mittleren Stammdurchmesser in einem voll bestockten und unbewirtschafteten Baumbestand und der Stammanzahl pro Flächeneinheit beschreibt. Indem die arttypische Durchmesser-Biomasse-Relation in das Gesetz von REINEKE eingesetzt wird, kann dieses in die Selbstdifferenzierungsregel nach YODA ET AL. (1963) überführt werden. Diese sagt aus, dass das mittlere Gewicht innerhalb einer gleichaltrigen Pflanzenpopulation bei ungestörter Entwicklung mit der Pflanzendichte $m^{-3/2}$ allometrisch verbunden ist.

Die hier beschriebenen allometrischen Beziehungen liefern Hinweise auf mögliche Beziehungen, die in Bezug auf das Widerstandsverhalten von Vegetation und deren Parametrisierung von Interesse sind. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die bislang erarbeiteten funktionalen Zusammenhänge überwiegend empirischer Natur sind und sich auf Arten beziehen, die für die Forstwirtschaft, nicht jedoch für den Wasserbau zwingend von Interesse sind. Es muss weiterhin berücksichtigt werden, dass allometrische Funktionen artspezifisch sind (PRETZSCH 2010) und nicht ohne weiteres auf andere Arten übertragen werden können. Aufgrund des überwiegend empirischen Charakters der Funktionen sind diese zudem überlagert von standortspezifischen Einflussfaktoren und beinhalten eine Streubreite. Nichtsdestotrotz können allometrische Funktionen, wenn sie von relevanten Arten abgeleitet werden, nützlich bei der Ableitung vegetationsparameterbezogener Widerstandsbeziehungen sein. Insbesondere sind Beziehungen unter Verwendung der Blattfläche vielversprechend, da die Blattfläche einen signifikanten Einfluss auf den Vegetationswiderstand hat. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Blattfläche führte JÄRVELÄ (2004) den Blattflächenindex LAI ein (vgl. Abschnitt 2.2.1.2), der über Fernerkundungsmaßnahmen bestimmt werden kann (vgl. ANTONARAKIS 2010).

In Bezug auf die Literaturrecherche zu den allometrischen Beziehungen muss angemerkt werden, dass diese nicht mehr als einen Überblick über aktuelle Entwicklungen darstellt und die Möglichkeiten aufzeigt, welche sich in Bezug auf die Parametrisierung von Vegetation eröffnen.

2.2 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Bewuchsfeldern

Einzelne Vegetationselemente spielen, obwohl ihr Vorkommen an Flussläufen nicht selten ist, in Hinsicht auf die Auswirkung auf die Hydraulik eines zu betrachtenden Flussabschnittes eine eher untergeordnete Rolle. Treten Vegetationselemente in der Form von Bewuchsfeldern auf, bestehend aus einer Vielzahl beliebig angeordneter einzelner Vegetationselemente, kann deren Interaktion mit

der Strömung jedoch beträchtliche Auswirkungen auf verschiedene hydraulische Größen haben. Dazu zählen laut YEN (2002) unter anderem die Erhöhung des Fließwiderstandes und die Beeinflussung des Sedimenttransportes sowie des Erosions- und Sedimentationsverhaltens. Laut JÄRVELÄ ET AL. (2006) nimmt Vegetation eine Schlüsselfunktion bei Erosion, Transport und Ablagerungsprozessen von Feststoffen, Nährstoffen und Schadstoffen ein. Auch JORDANOVA & JAMES (2003) stellten fest, dass die Präsenz von Vegetation den Gesamtließwiderstand erhöht und die Sohlenschubspannung verringert, was zur Reduzierung der Sedimenttransportkapazität und der Neigung zur Sedimentation und Stabilisierung von Sedimenten führt. Sedimentablagerungen auf bewachsenen Vorländern können die Abflusskapazität für zukünftige Hochwasserereignisse signifikant reduzieren (DITTRICH & JÄRVELÄ 2005) und damit die Hochwassergefahr verschärfen. Die Auswirkungen der komplexen Interaktion zwischen Strömung und Vegetation können also im praxisbezogenen Kontext auf die Veränderung des Fließwiderstandes und die Beeinflussung des Sedimenttransportes reduziert werden.

Der quantitative Einfluss der Vegetation auf den Gesamtließwiderstand ist von einer Vielzahl komplexer und interagierender Faktoren abhängig. Neben der Anordnung von Vegetation im Gerinnequerschnitt ist der Einfluss der Vegetation unter anderem abhängig von den geomorphologischen Gerinneigenschaften, von der Ausdehnung der Vegetation und von der Vegetationsdichte sowie der Vegetationsart (DVWK 1991).

Einen weiteren Beitrag zum Gesamtließwiderstand leistet der Sohlenwiderstand in einem Bewuchsfeld. RIGHETTI (2008) zeigte, dass der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand einen Anteil von bis zu 45 % erreichen kann. Der quantitative Anteil des Sohlenwiderstandes ist neben den Sohleneigenschaften jedoch stark von der Beeinflussung der hydraulischen Parameter durch die Vegetation abhängig (vgl. FREEMAN ET AL. 2000). Neben der Kenntnis des Beitrags des Sohlenwiderstandes zum Gesamtließwiderstand ist zudem auch die Kenntnis der Größen von Sohlenschubspannung τ_0 und Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* , welche die Sedimentbewegung beeinflussen, von Bedeutung.

Unter der Bedingung eindimensionaler, stationär gleichförmiger Strömungsverhältnisse kann der Gesamtwiderstand, bestehend aus Sohlenwiderstand und dem Vegetationswiderstand, resultierend aus dem Kräftegleichgewicht in einem Kontrollvolumen analog zu PETRYK & BOSMAJIAN (1975), wie folgt berechnet werden:

$$\rho g S h B \Delta l = \tau_0' B \Delta l + \sum_{i=1}^N F_{D,i} \quad (2.7)$$

wobei ρ = Fluideichte; S = Wasserspiegellagenneigung; B = Gerinnebreite; Δl = Länge des Kontrollvolumens; τ_0' = Sohlenschubspannung; $F_{D,i}$ = Widerstandskraft des i-ten Vegetationselementes.

Dieser Ansatz, bei welchem eine Mittelung der Eingangsparameter über den gesamten Untersuchungsabschnitt stattfindet und keine detaillierte Aussage über lokale Verhältnisse getroffen werden kann, wurde unter anderem in JORDANOVA & JAMES (2003), BAPTIST (2005), GHISALBERTI & NEPF

(2004), STONE & SHEN (2002) angewendet. ABERLE ET AL. (2010a) merken jedoch an, dass aufgrund der Heterogenität der Strömung innerhalb eines Bewuchsfeldes streng betrachtet eine ungleichförmige Strömung vorliegt, da sich die Wassertiefe und die Strömungsgeschwindigkeit entlang des Fließweges ändern. ABERLE ET AL. (2010a) empfehlen daher räumlich gemittelte Größen der Wassertiefe h , der WSP-Neigung S und der Sohlschubspannung τ_0' zu verwenden. Streng genommen muss in Gl. (2.7) das Volumen der Vegetation im Kontrollvolumen berücksichtigt werden. JAMES ET AL. (2004) zeigten jedoch, dass deren Vernachlässigung zu keinem signifikanten Genauigkeitsverlust führt.

Eine weitere, vielfach praktizierte Vorgehensweise bei der Untersuchung von durch- und überströmter Vegetation ist die Anwendung des Superpositionsprinzipes (vgl. EINSTEIN & BANKS 1950). Dabei werden die Einzelwiderstände linear überlagert und zu einem Gesamtwiderstand zusammengefasst. Diese Vorgehensweise ist für eindimensionale Betrachtungsweisen geeignet und erlaubt keine detaillierte Untersuchung der Vegetation auf die Geschwindigkeitsverteilung über die Fließtiefe oder die Gerinnebreite. Das Superpositionsprinzip wird in hydraulischen Modellversuchen angewendet, wenn keine direkte Bestimmung des Vegetationswiderstandes durch Kraftmessungen erfolgen kann, sondern eine Bestimmung durch eine indirekte Vorgehensweise bspw. aus dem Energieliniengefälle erfolgt. Dabei werden im Allgemeinen separate Versuche ohne Bewuchs zur Bestimmung der Sohlenrauheit bei äquivalenten Fließtiefen durchgeführt. Der so bestimmte Sohlenwiderstand wird dann vom Gesamtwiderstand des Bewuchsfeldes entsprechend des Superpositionsprinzipes subtrahiert.

Nach YEN (2002) erfolgt die Superposition für die Schubspannung τ_0 , den Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten f und den Manning-Beiwert n wie folgt:

$$\tau_0 = \tau_0' + \tau_0'' \quad (2.8)$$

$$f = f' + f'' \quad (2.9)$$

$$n^2 = n'^2 + n''^2 \quad (2.10)$$

Mit τ_0 = Gesamtschubspannung, f , n = Gesamtwiderstände; τ_0' = Sohlschubspannung, f' , n' = Oberflächenwiderstände; τ_0'' = Schubbeanspruchung der Rauheitselemente, f'' , n'' = Formwiderstände.

Basierend auf der Unterteilung zwischen Vegetationswiderstand und Sohlenwiderstand wird im Folgenden der Stand der Forschung zusammenfassend dargestellt.

2.2.1 Vegetationswiderstand

In Abschnitt 2.1 wurde der Stand der Forschung zum Widerstandsverhalten starrer und flexibler Vegetation zusammengefasst. Es wurde deutlich, dass sich das Widerstandsverhalten flexibler und starrer Einzelelemente grundlegend unterscheidet. Im Folgenden sollen Ansätze vorgestellt werden, die eine Berechnung des Vegetationswiderstandes in einem Bewuchsfeld ermöglichen, wobei zwischen starrer und flexibler Vegetation unterschieden wird.

2.2.1.1 Starre Vegetation

Der Großteil bereits durchgeführter Untersuchungen zum Fließwiderstand von Vegetation basiert auf der Theorie und Experimenten mit starren zylindrischen Elementen (z.B. LI & SHEN 1973, LINDNER 1982, KAISER 1984, PASCHE 1984, PASCHE & ROUVÉ 1985, BERTRAM 1985, RICKERT 1986, DUNN ET AL. 1996, NEPF 1999, SPECHT 2002, JORDANOVA & JAMES 2003, SCHNAUDER 2004, POGGI ET AL. 2004, MUSLEH & CRUISE 2006, KOTHYARI ET AL. 2009a, 2009b, und andere).

Die Problematik der Widerstandsbestimmung eines Bewuchsfeldes aus starren Zylindern reduziert sich aufgrund der starren Eigenschaften auf die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes C_D , welcher abhängig von der Definition der Referenzströmungsgeschwindigkeit u_R ist. Diese wird bei einem einzelnen isolierten Zylinder zu u_m definiert. Dabei kann angenommen werden, dass die Abweichungen zwischen mittlerer Strömungsgeschwindigkeit u_m und der Anströmgeschwindigkeit u_i vernachlässigt werden können ($u_m \approx u_i$), wenn kein Einfluss durch die Verbauung auf die Geschwindigkeitsverteilung besteht. Diese Annahme ist in einem Bewuchsfeld im Allgemeinen jedoch nicht haltbar, da sich infolge der sich überlagernden Nachlaufströmungen hinter den Elementen ein heterogenes Strömungsfeld ausbildet.

In Abhängigkeit der longitudinalen (a_x) und transversalen (a_y) Abstände der Zylinderreihen, des Zylinderdurchmessers d und weiterer Parameter, unterscheiden sich die Anströmgeschwindigkeit u_i und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m teilweise signifikant voneinander (vgl. LINDNER 1982). Während in einem Bewuchsfeld der Widerstandsbeiwert jedes einzelnen Zylinders $C_{D,i}$ unter Verwendung der individuellen Anströmgeschwindigkeit u_i nach Abb. 2.1 bestimmt werden kann, ist für die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes C_D in Abhängigkeit von u_m die Anwendung eines Ansatzes nach bspw. LI & SHEN (1973), LINDNER (1982), PASCHE & ROUVÉ (1985) oder WILKERSON (2007) erforderlich. Mit diesen Ansätzen, welche die individuelle Geschwindigkeitsverteilung infolge der sich überlagernden Nachlaufströmungen hinter den Zylinderelementen berücksichtigen, kann der Widerstandsbeiwert eines Zylinders bei beliebiger Anordnung, Dichte und Durchmesser innerhalb der Anwendungsgrenzen der Verfahren in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m berechnet werden.

Obwohl diese Ansätze die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes a priori ermöglichen, werden sie aufgrund ihrer Anwendungsgrenzen und des erhöhten Berechnungsaufwandes nicht konsequent angewendet. Stattdessen sind in der Literatur teilweise widersprüchliche Aussagen über die Abhängigkeit zwischen C_D -Werten, Anordnungen, Dichten und weiteren Randbedingungen zu finden. Bspw. maßen KOTHYARI ET AL. (2009a) die Widerstandskräfte auf einen einzelnen Zylinder im Vegetationsfeld und beobachteten größere C_D -Werte im Vegetationsfeld als für einen einzelnen isolierten Zylinder. Dies steht im Widerspruch zu den Beobachtungen von PETRYK (1969), LINDNER (1982), DUNN ET AL. (1996), NEPF (1999) und POGGI ET AL. (2004), die im Vegetationsfeld sinkende C_D -Werte mit steigender Vegetationsdichte und Re_d ermittelt haben (vgl. ABERLE ET AL. 2010a). Die Ursachen dieser widersprüchlichen Resultate können vielfältig sein und sind u.a. auf den Versuchsaufbau, die Vegetationsdichte und -anordnung, Strömungsverhältnisse, die

Genauigkeit der Kraftmessgeräte und die Definition der verwendeten Parameter zurückzuführen. Entgegen der allgemeinen Feststellung sinkender C_D -Werte mit steigender Stamm-Reynoldszahl Re_d im Bewuchsfeld empfiehlt DVWK (1991) die Verwendung von $C_D = 1,5$. Auch STONE & SHEN (2002) empfehlen ungeachtet von der Größe und Dichte der Zylinder einen konstanten Wert $C_D = 1,05$, wenn die maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit verwendet wird. Eine Übersicht angewendeter C_D -Werte in eindimensionalen numerischen Modellen und von gemessenen C_D -Werten in Laborversuchen ist in BAPTIST (2005) zu finden.

Ansatz zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders in einem regelmäßigen Feld von umströmten Zylindern

PETRYK (1969) und auch LINDNER (1982) zeigten für Bewuchsfelder mit regelmäßig angeordneten starren zylindrischen Elementen, dass der Widerstandsbeiwert C_D eines Elementes, unter Verwendung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m , vom Elementdurchmesser d , den Abständen in longitudinaler a_x und transversaler a_y Strömungsrichtung, von der individuellen Anströmgeschwindigkeit $u_{0,i}$ und der Gerinneneigung S abhängig ist.

Für die Berechnung der individuellen Anströmgeschwindigkeit jedes Elementes im Bewuchsfeld wurde von PETRYK (1969) die lineare Überlagerung der Nachlaufströmungen hinter den Kreiszyklindern vorgeschlagen. Dieses Überlagerungskonzept ist jedoch nur gültig unter der Berücksichtigung verschiedener Annahmen, wie sehr kleiner Geschwindigkeitsabnahmen und kleiner Störkörper im Vergleich zum Außenströmungsbereich, einem geraden, rechteckigen Gerinne, stationär-gleichförmiger Strömung und zweidimensionaler Strömungsverhältnisse, der Anwendbarkeit der Turbulenztheorie nach REICHARDT (1941) und sich unabhängig vom Einfluss benachbarter Zylinder ausbildende Nachlaufströmungen.

Aufbauend auf dem Überlagerungskonzept von PETRYK (1969) und dem Berechnungsansatz von LI & SHEN (1973) stellte LINDNER (1982) einen erweiterten Berechnungsablauf vor, der den Einfluss durch die Verbauung (RICHTER 1973) und von Schwerewellen auf die Strömungsverhältnisse berücksichtigt. Dabei wird die Geschwindigkeitsverteilung im Nachlaufbereich eines Zylinders näherungsweise durch eine Integralfunktion nach REICHARDT (1941) beschrieben.

Die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung und daraus resultierend die Verteilung des Geschwindigkeitsverlustes u_d kann nach LINDNER (1982) in Abhängigkeit des Abstandes Δx hinter einem Zylinder wie folgt berechnet werden:

$$u_{d,\Delta x}(z) = u_{\Delta x, \max} e^{-0.69 \left(\frac{z}{b_{1/2, \Delta x}} \right)^2} \quad (2.11)$$

wobei z = Koordinate quer zur Strömungsrichtung, $u_{\Delta x, \max}$ = maximales, tiefengemitteltes Geschwindigkeitsdefizit in der Mitte der Nachlaufströmung, $b_{1/2}$ = halbe Breite der Nachlaufströmung bei der $u_{d,\Delta x} = u_{\Delta x, \max}/2$ ist (LI & SHEN 1973, LINDNER 1982). Das maximale Geschwindigkeitsdefizit kann berechnet werden mit:

$$u_{\Delta x, \max} = -0,9 \left(\frac{\Delta x}{C_{D\infty} d} \right)^{-0,7} \left[\frac{1}{1 + \frac{2g\Delta x S}{u_0^2}} \right]^{1,5} u_0 \quad (2.12)$$

mit u_0 und $C_{D\infty}$ = Anströmgeschwindigkeit und Widerstandsbeiwert des Zylinders nach Abb. 2.1, welcher die Nachlaufströmung erzeugt. Die Breite der Nachlaufströmung $b_{1/2}$ kann nach (PETRYK 1969) berechnet werden, zu:

$$b_{1/2, \Delta x} = 0,24 \Delta x^{-0,7} (C_{D\infty} d)^{0,41} \quad (2.13)$$

Ausgehend von der ersten Zylinderreihe für die $u_{01} = u_0$ gilt, kann die Anströmgeschwindigkeit der zweiten Reihe und aller weiteren Reihen mit den Gleichungen (2.11) bis (2.13) berechnet werden. Nach LINDNER (1982) ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit des n -ten Zylinders wie folgt:

$$u_{0,n} = u_0 + \sum_{i=1}^{n-1} u_{\Delta x, i, \max} \left(e^{-0,69 \left(\frac{z_n - z_i}{b_{1/2, \Delta x, i}} \right)^2} - \frac{1}{B} \int_B e^{-0,69 \left(\frac{z - z_i}{b_{1/2, \Delta x, i}} \right)^2} dz \right) \quad (2.14)$$

mit B = Gerinnebreite und z_n, z_i = Koordinaten quer zur Strömungsrichtung des n -ten und i -ten Zylinders.

Rein rechnerisch erfolgt die Superposition der linear überlagerten Geschwindigkeitsdefizite in den Nachlaufbereichen bei hintereinander angeordneten Körpern unbegrenzt. Zur Reduktion des Berechnungsaufwandes wurde von LINDNER (1982) ein Grenzkriterium eingeführt, welches das Geschwindigkeitsdefizit nur bis zu einem Anteil von 3% der ungestörten Fließgeschwindigkeit berücksichtigt. Aufgrund dieses Grenzkriteriums ergibt sich in den Berechnungen von LINDNER (1982) nach $n = 20$ Reihen von Störkörpern eine näherungsweise konstante Strömungsgeschwindigkeit u_{020} .

LINDNER (1982) führte eine Modellrechnung für vier verschiedene Durchmesser d , zwei Anordnungen (versetzt und parallel), verschiedene relative Längsabstände (a_x/d) und relative Reihenabstände (a_y/d) unter Annahme eines konstanten Sohlengefälles ($S = 1 \text{ ‰}$) und einer konstanten Anfangsgeschwindigkeit $u_0 = 0,1 \text{ m/s}$ durch. Das Ergebnis dieser Modellrechnung ist in Abb. 2.5 dargestellt und kann nach LINDNER (1982) für eine grobe Vordimensionierung, bspw. für Bewässerungskanäle, auch für andere Neigungen und Strömungsgeschwindigkeiten genutzt werden.

Die Berechnungen von LINDNER (1982) zeigten folgende qualitative Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Anströmgeschwindigkeit:

1. Mit steigendem relativem Längsabstand a_x/d der Elemente nimmt die relative Anströmgeschwindigkeit u_{020}/u_0 zu. Für $a_x/d > 40$ ist der Störeinfluss durch stromauf befindliche Körper vernachlässigbar klein.
2. Mit zunehmendem relativem Querabstand a_y/d nimmt u_{020}/u_0 geringfügig ab. Für $a_y/d > 10$ ist u_{020}/u_0 nahezu unabhängig vom Reihenabstand.

3. Bei versetzter Anordnung ist u_{020}/u_0 größer als bei paralleler Anordnung.
4. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit u_0 und abnehmendem Sohlengefälle S nimmt u_{020}/u_0 ab.

Unter Kenntnis der Anströmgeschwindigkeit u_{020} oder der aus Abb. 2.5 bestimmten relativen Anströmgeschwindigkeit $u_i/u = u_{020}/u_0$ kann der Widerstandsbeiwert $C_{D,i}$ unter der Berücksichtigung der Einflüsse der Verbauung, des Elementdurchmessers d , der Elementabstände wie folgt berechnet werden:

$$C_{D,i} = C_{D\infty} \cdot \left(1 + 1,9 \cdot \frac{d}{a_y} \cdot C_{D\infty} \right) \cdot \left(\frac{u_{0,i}}{u_0} \right)^2 + \Delta C_D \quad (2.15)$$

Wobei $C_{D\infty}$ = Widerstandsbeiwert eines isolierten Einzelzylinders bei ungestörten Strömungsverhältnissen und ΔC_D = Einfluss von Schwerewellen, der durch Gl. (2.16) berücksichtigt wird:

$$\Delta C_D = \frac{2}{Fr^2} \left(1 - \frac{y_u}{y_0} \right) \quad (2.16)$$

mit $Fr = u_{0,i} / \sqrt{gy_0}$, y_o , y_u = Ober- und Unterwasserstand des Zylinders.

Zur Vereinfachung der aufwendigen Berechnungen bestimmte LINDNER (1982) eine Ausgleichsfunktion aus den Ergebnissen die mit Gl. (2.14) ermittelt wurden, wodurch eine wesentliche Vereinfachung der Berechnung für die Reihenanordnung ermöglicht wird:

$$C_D = \left(1 + 1,9 \frac{d}{a_y} C_{D\infty} \right) \left(0,2025 \left(\frac{a_x}{d} \right)^{0,46} C_{D\infty} \right) + \left(\frac{2a_y}{a_y - d} - 2 \right) \quad (2.17)$$

Für den Anwendungsbereich der durch LINDNER (1982) untersuchten Bewässerungskulturen ($0,1 \text{ m/s} < u_m < 0,3 \text{ m/s}$; $0,1 \% < S < 0,2 \%$; $1 < a_x/d < 33$) berechnete er die maximalen Abweichungen zwischen den Rechenwerten nach (2.15) und (2.17) zu $\pm 6 \%$.

Zur Validierung des Ansatzes führte LINDNER (1982) Versuche in einer rechteckigen Versuchsrinne durch und erreichte nach eigenen Angaben eine gute Übereinstimmung zwischen prognostizierten und gemessenen Geschwindigkeitsprofilen im Vegetationsfeld. Eine direkte Messung der Widerstandskräfte wurde jedoch nicht durchgeführt. Bei den direkten Kraftmessungen durch PETRYK (1969) traten Abweichung zwischen prognostizierten und gemessenen C_D -Werten in der Größenordnung von $\pm 30\%$ auf. Inwiefern die Schwankungsbreite der Kraftmessungen auf die natürliche Heterogenität der Strömungsstruktur im Vegetationsfeld zurückgeführt werden kann, bleibt jedoch aufgrund der Messung an einem Einzelelement offen. Multiple und simultane direkte Kraftmessungen in einem Bewuchsfeld zur Validierung der Ansätze von LI & SHEN (1973) oder LINDNER (1982) sind derzeit nicht bekannt.

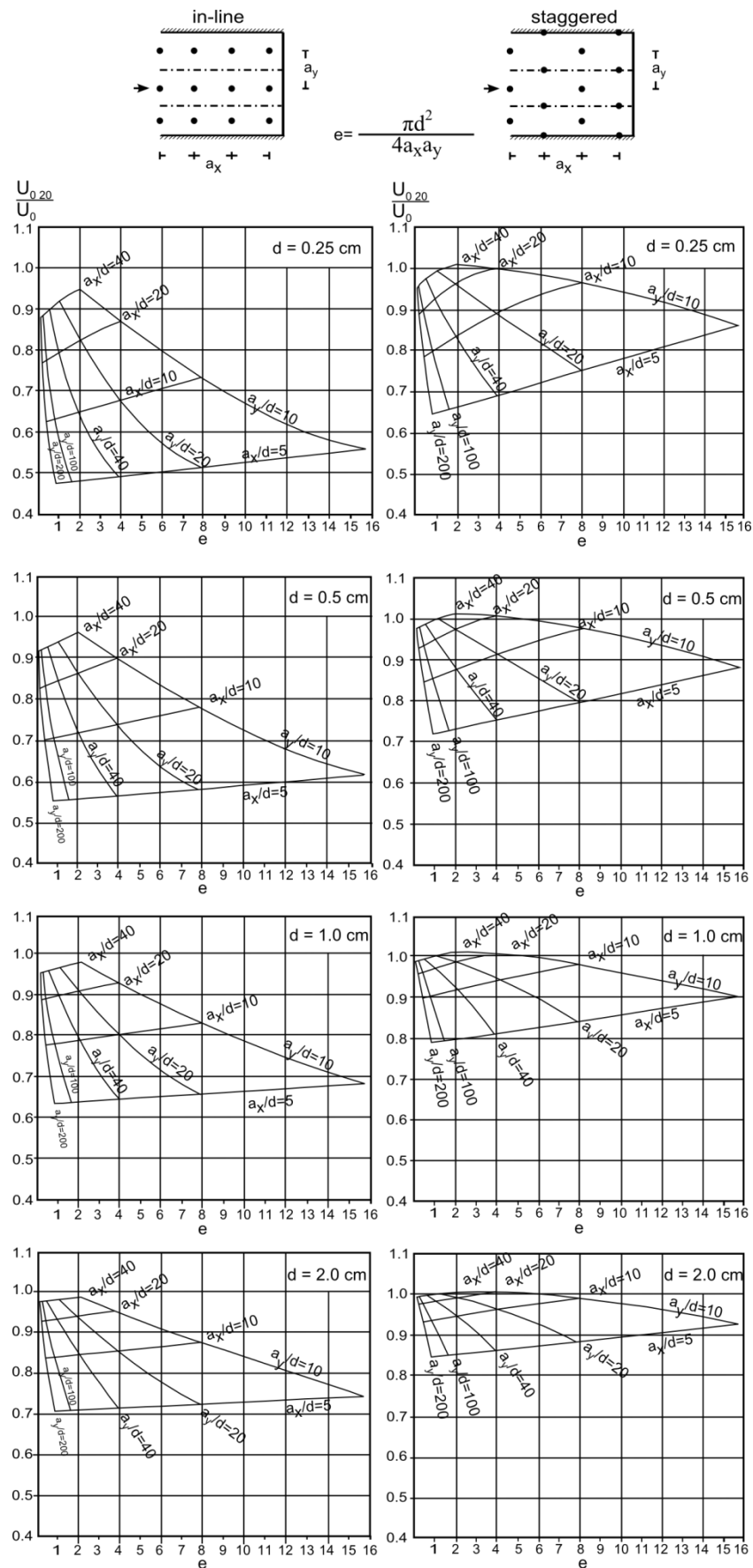


Abb. 2.5 Relative Anströmgeschwindigkeit als Funktion der Elementkonzentration zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders inmitten weiterer Zylinder nach LINDNER (1982).

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und vertikales Geschwindigkeitsprofil

Für Bewuchsfelder aus starren Zylindern mit dem Elementdurchmesser d und der Vegetationsdichte m (Anzahl der Elemente N pro m^2), wobei $m = 1/(a_x a_y)$, folgt aus Gl.(2.7):

$$gSh = \frac{\tau_0'}{\rho} + \frac{1}{2} m C_D h u_m^2 \quad (2.18)$$

Wobei C_D der räumlich gemittelte Widerstandsbeiwert (in Abhängigkeit von u_m) nach den Verfahren von LINDNER (1982) oder LI & SHEN (1973) ist.

Durch eine Umstellung von Gl.(2.18) nach u_m erhält man:

$$u_m = \sqrt{\frac{gS - \frac{\tau_0'}{\rho h}}{0,5 C_D m d}} \quad (2.19)$$

Aus Gl.(2.19) folgt, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m unabhängig von der Fließtiefe ist, wenn der C_D -Wert und der Elementdurchmesser d über die Elementhöhe konstant sind (vgl. NIKORA ET AL. 2004) und der Einfluss der Sohlenrauheit vernachlässigt werden kann. Bei konstanter Sohlenneigung ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in einem Bewuchsfeld aus starren Zylindern demnach nur von der Veränderung der Sohlenschubspannung mit steigendem Durchfluss Q abhängig. LI & SHEN (1973) berichteten in diesem Zusammenhang von ansteigenden mittleren Sohlenschubspannungen bei steigendem Durchfluss und steigender Sohlenneigung.

Es sei hier angemerkt, dass das vertikale Geschwindigkeitsprofil innerhalb eines Bewuchsfeldes aus starren Zylindern mit $H > h$ bspw. in LINDNER (1982), DUNN ET AL. (1996) XAVIER (2010) u.a. gemessen wurde, wobei mit Ausnahme des sohlennahen Bereichs, welcher durch die Sohlenrauheit beeinflusst wird, eine konstante Geschwindigkeitsverteilung über die Fließtiefe gemessen wurde. Weitere Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung in einem Bewuchsfeld, welches aus starren Zylindern mit zwei unterschiedlichen Längen besteht, wurden erst kürzlich durch LIU ET AL. (2009) durchgeführt. Weiterhin entwickelten HUAI ET AL. (2009) ein mathematisches Modell für die Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Vegetationsdichte für durch- und überströmte Vegetation aus starren Zylindern. Für weitere Information sei an dieser Stelle auf die zitierten Veröffentlichungen verwiesen.

Widerstandskoeffizienten, Anwendung in Fließformeln

Bei eindimensionaler Betrachtungsweise kann der Vegetationswiderstand auf einen Oberflächenwiderstand reduziert werden, indem die Widerstandskraft auf eine Grundflächeneinheit bezogen wird. Diese Vorgehensweise ist üblich, und wird unter Annahme der Gültigkeit des Superpositionsprinzips nach EINSTEIN & BANKS (1950) oder SCHLICHTING (1936) angewendet, wenn Rauheitsbeiwerte wie der Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten, ein Manning oder Strickler-Beiwert oder ein Chézy-Beiwert ermittelt werden sollen, die in den entsprechenden Fließformeln verwendet werden.

Die Beziehung für den Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten lautet:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{u_m}{\sqrt{ghS}} \quad (2.20)$$

Zusammen mit Gl. (2.18) kann der Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizient f unter Vernachlässigung der Sohlenschubspannung wie folgt berechnet:

$$f = \frac{4dh}{a_x a_y} C_D \quad (2.21)$$

wobei LINDNER (1982) die Anwendbarkeit auf umströmte Kreiszylinder mit einer Elementhöhe $H > h$ begrenzte.

Ansatz von JÄRVELÄ (2004) für natürliche starre, unbelaubte Vegetation

Einen Ansatz zur Berechnung des Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten f für starre unbelaubte natürliche Vegetation entwickelte JÄRVELÄ (2004) indem er Gl. (2.21) für starre Zylinder adaptierte und den Zylinderdurchmesser d durch einen charakteristischen Durchmesser d_r ersetzte:

$$f'' = \frac{4d_r h}{a_x a_y} C_D \quad (2.22)$$

Der charakteristische Durchmesser d_r wird dabei wie folgt berechnet:

$$d_r(h) = \frac{A_p(h)}{h} \quad (2.23)$$

$$A_p(h) = \frac{h}{H} A_{p,tot} \quad \text{für } 0 \leq h \leq H \quad (2.24)$$

wobei h = Fließtiefe; H = Pflanzenhöhe; $A_{p,tot}$ = gesamte projizierte Fläche der Äste.

Der charakteristische Durchmesser d_r stellt eine Funktion der Fließtiefe dar und berücksichtigt die vertikale Verteilung der angeströmten Fläche $A_p(h)$, falls diese bekannt ist. Ansonsten kann $A_p(h)$ durch Gl. (2.24) berechnet werden, wodurch eine konstante Verteilung der angeströmten Fläche über die Pflanzenhöhe angenommen wird. In JÄRVELÄ (2002b) führte dies für die untersuchten Weidenäste nur zu einem geringen Fehler. Eine konstante Verteilung der Pflanzenfläche wurde auch im Ansatz von FATHI-MOGHADAM & KOUWEN (1997) angenommen und anhand der in Versuchen verwendeten Pflanzen gemessen (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Für die Ermittlung von $A_{p,tot}$ wurde von JÄRVELÄ (2004) ein Verfahren nach MCMAHON & KRONAUER (1976) sowie nach STRAHLER (1952) angewendet und weiterentwickelt, wobei die einzelnen Ästen nach einem bestimmten Ordnungsschema eingeteilt werden und ein mittlerer Astdurchmesser d_m bestimmt wird. Das Verfahren ermöglicht auch die Bestimmung der vertikalen Verteilung der angeströmten Fläche $A_p(h)$. Als Widerstandsbeiwert schlug JÄRVELÄ (2004) die

Verwendung von $C_D = 1,5$ vor und bemerkte, dass die Unsicherheiten bei der Bestimmung von A_P und d_r den Fehler bei der Wahl des Widerstandsbeiwertes überdecken.

Ein Vergleich zwischen dem Ansatz von JÄRVELÄ (2004) und den Ergebnissen unterschiedlicher Auswertungen eines terrestrischen Laser-Scann (TLS) wurde in ANTONARAKIS ET AL. (2010) durchgeführt und zeigten eine gute Übereinstimmung für die ermittelten projizierten Flächen.

2.2.1.2 Flexible Vegetation

Ansätze zur Berechnung des Vegetationswiderstandes für flexible, durchströmte oder gerade überströmte baum- und buschartige Vegetation in einem Bewuchsfeld mit $h/H \leq 1$ basieren, aufgrund der Komplexität der Problematik flexible und belaubte Vegetation zu parametrisieren (vgl. Abschnitt 2.1.2), überwiegend auf hydraulischen Modellversuchen. Vereinfachungen erfolgen üblicherweise durch Einführung artspezifischer Indizes deren Werte durch Regressionsanalysen gewonnen werden. Vegetationsspezifische Parameter beziehen sich dabei oftmals auf die Flexibilität und die Blattfläche. Diese Vorgehensweise setzt jedoch für eine Erweiterung der Berechnungsansätze auf andere Vegetationsarten weitere hydraulische Modellversuche voraus. KOTHYARI ET AL. (2009b) stellten in diesem Zusammenhang fest, dass bis heute kein universeller Ansatz zur Verfügung steht, mit welchem der Anstieg des Strömungswiderstandes infolge Vegetation direkt und a priori berechnet werden kann.

Einer der ersten Ansätze zur Berechnung des Vegetationswiderstandes eines Bewuchsfeldes basiert auf Kraftmessungen von einzelnen Vegetationselementen in Bewuchsfeldern und einzelnen, isolierten Vegetationselementen von FATHI-MOGHADAM (1996). FATHI-MOGHADAM maß in hydraulischen Modellversuchen die Widerstandskräfte auf einzelne Vegetationselemente (Zedern und Pinien) und bezog die ermittelten Widerstandskräfte F_D auf die durch die Pflanzen bedeckte Grundfläche A_b :

$$\tau_0'' = \frac{F_D}{a} = \frac{1}{2} C_D \left(\frac{A_M}{A_b} \right) \rho u_m^2 \quad (2.25)$$

Zusammen mit der Definition der Sohlenschubspannung

$$\tau_0'' = \rho u_*^2 \quad (2.26)$$

und des Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten (vgl. Gl.(2.20))

$$f'' = 8 \left(\frac{u_*^2}{u_m^2} \right) \quad (2.27)$$

folgt aus Gln. (2.25), (2.26) und (2.27)

$$f'' = 4 C_D \left(\frac{A_M}{A_b} \right) \quad (2.28)$$

wobei A_M die widerstandserzeugende Fläche des Vegetationselementes darstellt und nach FATHI-MOGHADAM (1996) der einseitigen Blattfläche entspricht.

Zur Berücksichtigung der Flexibilität natürlicher Vegetation schlugen FATHI-MOGHADAM & KOUWEN (1997) ein Verfahren zur Bestimmung der Biegesteifigkeit EI vor, die aus der Eigenfrequenz ω_i der in Schwingung gebrachten Vegetationselemente bestimmt wird, nach:

$$\omega_i = \frac{\phi_i^2}{2\pi} \left(\frac{EI}{m_l l^4} \right)^{0,5} \quad (2.29)$$

wobei Φ_i = dimensionsloser Parameter der die Testrandbedingungen abdeckt; EI = Biegesteifigkeit; l = Vegetationslänge; m_l = Masse pro Längeneinheit.

Auf Grundlage dieser Definition führten KOUWEN & FATHI-MOGHADAM (2000) einen artspezifischen Vegetationsindex ξE ein, der für alle Vegetationselemente einer Spezies konstant ist. Der Parameter ξE berücksichtigt die Flexibilität, Form und Biomasse der Vegetationselemente:

$$\xi E = N\omega_l^2 \left(\frac{m_s}{H} \right) \quad (2.30)$$

mit $N\omega_l$ = Eigenfrequenz; m_s = Masse des Vegetationselementes.

Auf Grundlage einer Dimensionsanalyse und einer Regressionsanalyse mit den gewonnenen Widerstandskräften aus den Versuchen von FATHI-MOGHADAM (1996), wurde abschließend eine Gleichung zur Bestimmung des Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten für umströmte Nadelhölzer vorgeschlagen:

$$f'' = 4,06 \left(\frac{u_m}{\sqrt{\frac{\xi E}{\rho}}} \right)^{-0,46} \cdot \frac{h}{H} \quad (2.31)$$

Die Gleichung berücksichtigt die Verringerung des Widerstandskoeffizienten bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten. Mit steigender Fließtiefe wird außerdem ein linearer Anstieg des Vegetationswiderstandes angenommen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Für gerade überströmte Verhältnisse empfehlen KOUWEN & FATHI-MOGHADAM (2000) die Verwendung von $h/H = 1$. Die Werte für den artspezifischen Vegetationsindex ξE befinden sich für die untersuchten Elemente zwischen 2,07 N/m² und 4,54 N/m².

JÄRVELÄ (2002) bemerkte, dass die Messung der Eigenfrequenz eines Vegetationselementes in der Natur sehr schwierig durchzuführen ist. Somit ist die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens von KOUWEN & FATHI-MOGHADAM (2000) begrenzt, solange keine Werte des Parameters ξE für typische Bäume und Sträucher in der Literatur vorhanden sind.

In Bezug auf die Übertragbarkeit von am einzelnen Vegetationselement gemessenen Widerstandskräften, auf den Gesamtvegetationswiderstand eines Bewuchsfeldes, merkte GRANT (1984) an, dass

der gemessene Widerstand eines Bewuchsfeldes aus Fichten geringer war als der kumulative Widerstand der Einzelelemente. Er beurteilte dieses Ergebnis als Resultat von Abschattungseffekten und gegenseitiger Beeinflussung der Elemente im Vegetationsfeld. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Versuche in einem Luftströmungskanal im Bereich geringer Reynoldszahlen durchgeführt worden sind.

JÄRVELÄ (2004) folgerte aus den Ergebnissen seiner Literaturrecherche, dass die wesentlichen Eigenschaften bei der Aufstellung einer Widerstandsbeziehung die Vegetationsdichte und die Deformation der Pflanzen in der Strömung sind. JÄRVELÄ (2004) schlug die Verwendung des Blattflächenindex LAI als Schlüsselparameter für den Einfluss der Vegetationsdichte auf den Widerstand und einen artspezifischen Widerstandsbeiwert $C_{D\chi}$ vor. Weiterhin führte JÄRVELÄ (2004) einen artspezifischen Parameter ein, der den funktionalen Verlauf in Form einer Potenzfunktion zwischen Widerstandskoeffizienten f'' und der Strömungsgeschwindigkeit beschreibt. Aus Gl. 2.28 folgt damit:

$$f'' = 4C_{D\chi} LAI \left(\frac{u_m}{u_\chi} \right)^\chi \frac{h}{H} \quad (2.32)$$

mit $C_{D\chi}$ = artspezifischer Widerstandsbeiwert; LAI = Blattflächenindex = einseitige Blattfläche je Grundflächeneinheit; χ = artspezifischer Vegetationsparameter; u_χ = geringste Geschwindigkeit mit der χ bestimmt worden ist.

Die Anwendungsgrenzen des Ansatzes gibt JÄRVELÄ (2004) mit $h/H < 1$ und $u_m \geq u_\chi$ an. Werte für χ , $C_{D\chi}$, LAI wurden für eigene Versuchsreihen mit belaubten Weiden und für die Versuche von FATHI-MOGHADAM (1996) bestimmt und sind in JÄRVELÄ (2004) zusammengefasst.

FREEMAN ET AL. (2002) erachteten den Elastizitätsmodul E als kritischen Parameter bei der Berechnung des Vegetationswiderstandes flexibler Vegetation. Sie ermittelten E indem sie eine horizontale Kraft F_{45} in der Höhe des Zentrums der Blattmasse auf die Pflanze aufbrachten. Dabei ist die Kraft F_{45} so groß, dass die Pflanze um einen Winkel von 45° gebogen wird. Zusammen mit dem Stammdurchmesser D_S , der in der Höhe $H/4$ über dem Boden gemessen wird, kann der E-Modul E_S wie folgt berechnet werden:

$$E_S = 6,791 \frac{F_{45} H^2}{D_S^4} \quad (2.33)$$

FREEMAN ET AL. (2000) führten Laborversuche und Felduntersuchungen mit flexiblen Pflanzen durch und leiteten aus ihren Versuchsergebnissen eine empirische Gleichung für umströmte flexible Vegetation für eine relative Fließtiefe $h/H < 0,8$ ab:

$$\frac{u_*}{u_m} = \frac{\sqrt{g}}{C} = 3,487 \cdot 10^{-5} \left(\frac{E_S A_S}{\rho A_i^* u_*^2} \right)^{0,150} \left(m A_i^* \right)^{0,273} \left(\frac{u_* R_h}{\nu} \right)^{0,622} \quad (2.34)$$

wobei C = Chezy-Koeffizient; A_S = absolute Querschnittsfläche aller Äste einer Pflanze bei einer Höhe $H/4$; A_i^* = frontal angeströmte Fläche einer teilumströmten Pflanze; m = mittlere Vegetationsdichte je Grundflächeneinheit; R_h = hydraulischer Radius.

Verfahren zur Bestimmung von A_S und A_i^* sind in FREEMAN ET AL. (2002) beschrieben. Gl. (2.34) wurde unter Annahme eines vernachlässigbaren Anteils des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand entwickelt und ist als Verfahren zur Bestimmung des Gesamtwiderstandes zu werten.

Die Annahme eines vernachlässigbaren Sohlenwiderstandes wurde auch in FISCHENICH (1996) getroffen, obwohl die gemessenen Geschwindigkeitsprofile dem widersprachen. FISCHENICH (1996) entwickelte eine Gleichung zur Beschreibung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils in dichten Bewuchsfeldern. Auf Basis dieser Gleichung leitete er eine Widerstandsbeziehung zur Bestimmung des Manning n -Wertes ab, der aufgrund der Komplexität seiner Ermittlung hier nicht weiter beschrieben werden soll.

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung des Vegetationswiderstandes flexibler Vegetation ist die n -VR Methode. Bei diesem rein empirischen Ansatz werden alle Arten des Fließwiderstandes zu einem Gesamtwiderstandskoeffizienten zusammengefasst und es findet keine Unterscheidung zwischen der Widerstandsart statt. Dieser Ansatz, welcher dem Mannings n -Wert das Produkt aus mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und hydraulischem Radius für unterschiedliche Sohlenneigungen und Bewuchsformen zuordnet, wurde für grasbewachsene Kanäle entwickelt und berücksichtigt die Änderung des Mannings-Wertes mit steigender Fließtiefe. Da es mit diesem Ansatz nicht möglich ist, zwischen Oberflächenreibung, Formrauheit und Gerinnegeometrie zu unterscheiden, wurde er in der Vergangenheit oft kritisiert. Für die Beschreibung von Vegetation, welche signifikant durch die Wassersäule penetriert, ist er daher ungeeignet, wird jedoch oft als Grundlage für die Abschätzung des Fließwiderstandes grasbewachsener Kanäle herangezogen (z.B. RHEE ET AL. 2008).

2.2.2 Sohlenwiderstand

Untersuchungen zum Widerstand der Gerinnesohle in einem Bewuchsfeld können in die zwei Bereiche Aero- und Hydrodynamik unterteilt werden. In beiden Bereichen werden der Beitrag des Sohlenwiderstandes am Gesamtströmungswiderstand und die Auswirkung von Vegetation auf den Transport und die Ablagerung von Sedimenten untersucht. Dabei kommt in der Analyse das Superpositionsprinzip zur Anwendung, wobei die Einzelwiderstände aus Oberflächen- und Formwiderständen linear überlagert werden.

Aerodynamik

In der Aerodynamik konzentrieren sich die Fragestellung auf den Schutz von Landoberflächen gegenüber Winderosion. Dabei wird unter anderem nach Lösungen zum Schutz arider oder semiarider Gebiete gesucht, die durch einen signifikanten Winderosionsprozess betroffen sind. Im Unterschied zu den in dieser Arbeit behandelten durchströmten Bewuchsfeldern liegen in der

Aerodynamik überströmte Verhältnisse vor. Bislang ist der Einfluss nicht-erodierbarer starrer Strukturen, welche vereinfacht Vegetationselemente darstellen, auf den Sohlenschub, Thema einer Vielzahl von Veröffentlichungen (MARSHALL 1971, LYLES & ALLISON 1975, GILLETTE & STOCKTON 1989, MUSICK & GILLETTE 1990, MCKENNA NEUMANN & NICKLING 1995, CRAWLEY & NICKLING 2003, GILLIES ET AL. 2007 u.a.). TURPIN ET AL. (2010) geben an, dass ein genereller Konsens darin besteht, dass Rauheitselemente eine Erhöhung der kritischen Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit bewirken und die Sohlenerosion verringern.

Viele dieser Untersuchungen basieren direkt oder indirekt auf der Theorie der Kraftaufteilung von SCHLICHTING (1936). Das Prinzip besagt, dass die gesamte auf die mit Rauheitselementen bestückte Oberfläche wirkende Kraft F aufgeteilt werden kann in eine Kraft F_S , die auf die Sohlenoberfläche wirkt und eine Kraft F_R , die auf die Rauheitselemente wirkt. Werden die Kräfte durch die betrachtete Grundflächeneinheit dividiert, resultiert dieser Ansatz in Schubspannungen. Die Gesamtschubspannung τ wird demnach in die Anteile der Sohle τ_S und die Anteile der Rauheitselemente τ_R aufgeteilt und es gilt:

$$\tau = \tau_R + \tau_S \quad (2.35)$$

MARSHALL (1971) identifizierte potentielle Parameter, welche einen direkten Einfluss auf die Schubspannungsaufteilung haben. Darunter fallen die Höhe, der Durchmesser, die Form und die Orientierung oder die Verteilung der Rauheitselemente. Er stellte fest, dass die Sohlenschubspannung abnimmt, wenn die Bedeckung der Fläche durch Rauheitselemente ansteigt und, dass die Schubspannungsaufteilung primär von einem Rauheits-Dichte-Parameter λ und nur geringfügig von der Elementform und der Anordnung abhängt. Den Parameter λ definierte er wie folgt:

$$\lambda = \frac{NbH}{A_b} \quad (2.36)$$

wobei b = Breite der Rauheitselemente, H = Höhe der Rauheitselemente, N = Anzahl der Rauheitselemente in A_b und A_b = Grundfläche der Sohlenoberfläche.

STOCKTON & GILLETTE (1990) drückten die anteilmäßigen Schubspannungen anhand der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit u_{*t} aus, welche die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* beschreibt, bei welcher die Sedimente in Bewegung geraten. Die durch die Rauheitselemente dissipierten Kräfte können damit nach STOCKTON & GILLETTE (1990) durch das Verhältnis der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten R_t ausgedrückt werden:

$$R_t = \frac{u_{*tS}}{u_{*tR}} \quad (2.37)$$

wobei u_{*tS} den Wert u_{*t} für eine freiliegende, erodierbare Oberfläche und u_{*tR} den Wert für die gleiche Oberfläche mit nicht erodierbaren Rauheitselementen repräsentieren.

Felduntersuchungen von LANCASTER & BAAS (1998) zeigten, dass R_t mit steigendem λ kleiner wird, was durch eine steigende kritische Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_{*t} der mit Rauheitselementen besetzten Oberfläche zurückzuführen ist.

Ein analytischer Ansatz für die Schubspannungsaufteilung wurde von RAUPACH (1992) entwickelt. RAUPACH (1992) präsentierte eine theoretisch fundierte Beziehung der Schub- oder Kräfteaufteilung R , wodurch die Reduktion der Sohlenschubspannung mit den Charakteristiken der Nachlaufströmungen und Abschattungseffekten, die durch die Rauheitselemente erzeugt werden, in Beziehung gebracht wurde. Die Gleichung basiert auf den geometrischen Eigenschaften und dem Widerstandsverhalten von starren Elementen in turbulenter Strömung. Ziel war es, einfache prognostizierende Beziehungen für praktische Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Grundlage der Untersuchungen war die Charakterisierung der Nachlaufströmung eines isolierten Rauheitselementes durch eine effektive Abschattungsfläche und ein effektives Abschattungsvolumen. Die Abschattungsfläche beschreibt dabei die Reduktion der Sohlenschubspannung im Nachlaufbereich und das Abschattungsvolumen die Auswirkung eines Rauheitselementes auf die Widerstandskraft anderer Elemente in dessen Umgebung. Durch dieses Prinzip werden die realen Einflüsse vereinfacht durch eine Fläche und ein Volumen dargestellt, in denen keine Kräfte wirken.

Der auf einer Dimensionsanalyse basierende Ansatz wurde durch zwei heuristische Annahmen zur Turbulenzstruktur innerhalb der Rauheitselemente vereinfacht. Die erste Vereinfachung betrifft die Skalierung der effektiven Abschattungsfläche und des Volumens. Dabei wird für die Fläche und das Volumen die Form eines spitz zulaufenden Keils angenommen. Die zweite Vereinfachung besagt, dass die effektiven Abschattungsflächen und Volumen direkt überlagert werden können, wenn die Rauheitselemente gleichmäßig oder zufällig verteilt sind. Raupach ergänzt, dass eine wesentliche Limitierung darin besteht, dass bei hohen Rauheitsdichten λ die Interaktionen der Nachlaufströmungen so stark werden, dass beide Annahmen nicht mehr zutreffend sind.

RAUPACH (1992) führte den Parameter β ein, der das Verhältnis der Widerstandskoeffizienten der Rauheitselemente und der Sohle (ohne Rauheitselemente) beschreibt und den Einfluss der Elementform berücksichtigt. Für die Schubspannungsaufteilung gibt RAUPACH (1992) folgende Beziehung an:

$$\frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{1 + \beta\lambda} \quad (2.38)$$

mit τ_s = Sohlenschubspannung der Flächen zwischen den Rauheitselementen.

RAUPACH erweiterte seinen Ansatz in RAUPACH ET AL. (1993) durch den Faktor σ_A , der das Verhältnis der Grundfläche der Rauheitselemente zur frontal angeströmten Fläche der Rauheitselemente beschreibt. Weiterhin bezog er den Ansatz auf das Verhältnis der Schubspannungsgeschwindigkeiten, sodass:

$$R = \frac{u_{*s}}{u_{*R}} = \left[\frac{\tau_s}{\tau} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{(1 - \sigma_A\lambda)(1 + \beta\lambda)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

Die durch RAUPACH (1992) und RAUPACH ET AL. (1993) vorgeschlagene Gleichung zur Prognose der Schubspannungsaufteilung wurde durch die Daten verschiedener Autoren (MARSHALL 1971, CRAWLEY & NICKLING 2003, LANCASTER & BAAS 1998 und anderen) im Prinzip bestätigt.

Andere Autoren, wie bspw. BROWN ET AL. (2008) merkten an, dass die Sohlenschubspannung räumlich nicht gleichmäßig verteilt ist. Infolge der Um- und Überströmung der Rauheitselemente zeigt die Sohlenschubspannungsverteilung eine hohe räumliche Variabilität. RAUPACH ET AL. (1993) gab an, dass für den Bewegungsbeginn von Sedimenten nicht die räumlich gemittelte Sohlenschubspannung τ_S verantwortlich ist, sondern die maximal auftretende Sohlenschubspannung $\tau_{S,max}$. RAUPACH ET AL. (1993) führten einen Faktor m_e ein, der eine empirische Konstante mit $m_e \leq 1$ darstellt und die räumliche Variabilität der Sohlenschubspannungen berücksichtigt:

$$\tau_{S,max}(\lambda) = \tau_S(m_e \lambda) \quad (2.40)$$

Dabei besteht die Annahme, dass $\tau_{S,max}$ für eine bestimmte Oberflächenbeschaffenheit so groß ist wie τ_S mit einer geringeren Rauheitsdichte.

Zur weiteren Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen τ_S und $\tau_{S,max}$ wurde der Parameter m_e in Gl. (2.39) integriert und das Verhältnis zwischen kritischer Sohlenschubspannung und Gesamtschubspannung wurde definiert zu:

$$R_{max} = \left[\frac{\tau_{S,max}}{\tau} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{(1 - m_e \sigma \lambda)(1 + m_e \beta \lambda)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

wobei β und m_e unabhängige Parameter sind.

RAUPACH ET AL. (1993) schlugen für flache erodierbare Oberflächen Werte für $\beta = 100$ und $m_e = 0,5$ vor und für stabilisierte Oberflächen $m_e = 1,0$. Unabhängige Messungen anderer Forscher zeigten jedoch stark variierende Ergebnisse für β und m_e , wobei für β tendenziell höhere Werte ermittelt wurden, als durch RAUPACH ET AL. (1993) vorgeschlagen worden ist. Laut CRAWLEY & NICKLING (2003) ist es sehr problematisch, dass, obwohl das Modell von RAUPACH ET AL. (1993) praktisch anwendbar und generell unterstützt wird, die Vorhersage des Schubspannungsverhältnisses durch die Anpassung (Datenfit) von β und m_e mit praktisch jedem Datensatz möglich ist. Weiterhin stellen CRAWLEY & NICKLING (2003) fest, dass der Parameter m_e starken Schwankungen unterliegt und Werte aus Labor- und Naturuntersuchungen nicht konsistent sind. Außerdem machten sie deutlich, dass Gl. (2.41) aufgrund der Interaktion der Nachlaufbereiche hinter den Rauheitselementen nur für $\lambda \leq 0,1$ anwendbar ist.

In ihren Versuchen stellten CRAWLEY & NICKLING (2003) fest, dass unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit) und innerhalb der untersuchten Rauheitsdichten, zwischen mittlerer und maximaler Sohlenschubspannung ein konstantes proportionales Verhältnis von $\tau_{S,max}/\tau_S = 1,3$ besteht. Weiterhin beobachteten sie, dass mit steigender Elementdichte der Formwiderstand stieg und der Sohlenwiderstand sank. CRAWLEY & NICKLING (2003) folgerten aus ihren Messungen, dass die Schubspannungsaufteilung unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist.

Im Kontrast zu vorigen Beobachtungen stellten BROWN ET AL. (2008) fest, dass bei Oberflächen die eine geringe Dichte der Rauheitselemente aufweisen, zwar ein Teil der Energie durch die Rauheitselemente dissipiert wird, jedoch in unmittelbarer Nähe der Elemente die Strömungsgeschwindigkeit

keiten zunehmen, was zu einer Erhöhung der Sohlenschubspannungen führen kann. Ein ähnliches Verhalten stellten auch GILLIES ET AL. (2007) fest. Sie fanden heraus, dass bei größeren Elementdichten und bei bestimmten (unregelmäßigen) Anordnungen höhere Sohlenschubspannungen erzeugt werden. Demgegenüber führten gleichmäßig verteilte Rauheitselemente zu einer gleichmäßigeren Strömung über das Gebiet und geringeren Sohlenschubspannungen.

In Bezug auf den Einfluss der Elementanordnung auf die Größe der Sohlenschubspannung fanden KING ET AL. (2008) heraus, dass bei einer versetzten Anordnung der Rauheitselemente die Sohlenschubspannung mit steigendem Elementdurchmesser ansteigt, wenn die Dichte der Rauheitselemente λ konstant gehalten wird. Dies ist in Übereinstimmung mit den Beobachtungen von LI & SHEN (1973) und LINDNER (1982). BROWN ET AL. (2008) folgerten aus diesen Resultaten, dass die Verteilung der Sohlenschubspannung durch den Elementabstand beeinflusst wird und dies einen direkten Einfluss auf die Anteile von Oberflächen- und Formwiderstand am Gesamtwiderstand hat, wobei der quantitative Einfluss unterschiedlicher räumlicher Elementanordnungen ungelöst bleibt.

BROWN ET AL. (2008) untersuchten im Windkanal den Einfluss unterschiedlicher räumlicher Anordnungen starrer Rauheitselemente auf die Schubspannungsaufteilung und die damit verbundene Variation in der Verteilung der Sohlenschubspannungen. BROWN ET AL. (2008) untersuchten Vegetationsdichten von 12,8 Elemente/m², 21,9, 37,5 und 69,9 Elemente/m². Dabei wurde der Gesamtwiderstand durch Addition der Einzelwiderstände nach Gl. (2.8) ermittelt. Sie fanden heraus, dass sowohl die Widerstandskraft der Rauheitselemente als auch die Sohlenschubspannung mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zunimmt und durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann. Dabei stieg für jede Anordnung der Rauheitselemente τ_R linear mit $\log \lambda$. Demgegenüber wurde ein negatives Verhältnis zwischen τ_S und $\log \lambda$ beobachtet, was auf die steigenden Abschattungseffekte der Rauheitselemente zurückgeführt wurde.

Weiterhin folgerten BROWN ET AL. (2008) aus den Versuchsergebnissen, dass die Anordnung der Rauheitselemente nur einen geringen Einfluss auf den Anteil der Sohlenschubspannung am Gesamtwiderstand und auf die maximalen Sohlenschubspannungen hat. Sie stellten fest, dass die Sohlenschubspannungen und auch die Schubbeanspruchungen der Rauheitselemente mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit anstiegen und die Maximalwerte der Sohlenschubspannungen im Mittel um das 1,9-fache größer waren als die räumlich gemittelten Werte. BROWN ET AL. (2008) folgerten weiterhin, dass das Modell von RAUPACH ET AL. (1993) (Gl. (2.41)) auch für unregelmäßige Anordnungen der Rauheitselemente anwendbar ist, obwohl es die gemessenen Werte geringfügig unterschätzte.

Hydrodynamik

Eine Anwendung des Modells von RAUPACH (1992) nach Gl. (2.38) wurde durch THOMPSON ET AL. (2003, 2004) für den Anwendungsbereich des Wasserbaus durchgeführt. THOMPSON & WILSON (2002) entwickelten ein Kraftmessgerät zur direkten Bestimmung der Widerstandskräfte idealisier-

ter, starrer Zylinder und bestimmten die Sohlenschubspannungen mit einem Hitzdraht-Sensor. Der Widerstandsbeiwert C_S der Sohlenoberfläche wurde wie folgt bestimmt:

$$C_S = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2} \quad (2.42)$$

Die Bestimmung von C_S wurde indirekt mit Gl. (2.42) und der Messung der Wasserspiegellagenneigung durchgeführt, wobei sich keine Vegetationselemente in der Strömung befanden. Bei einer konstanten Gerinneneigung $S = 1\%$ wurde der Durchfluss variiert und durch Regressionsanalyse die Abhängigkeit zwischen C_S und Q zu $C_S = 0,0016 Q^{-0,2266}$ bestimmt. Bei der Variation des Durchflusses Q variiert der Widerstandsbeiwert der Sohle C_S auch mit der Fließtiefe h . Der Widerstandsbeiwert C_R der Rauheitselemente ist jedoch unabhängig von der Fließtiefe. Damit ergeben sich für β veränderliche Werte in Abhängigkeit der Fließtiefe. Dies steht im Kontrast zu den Untersuchungen in der Aerodynamik, wo überwiegend konstante Werte bestimmt wurden (RAUPACH 1992). BROWN ET AL. (2008) führten unabhängige Messungen von C_R und C_S durch, wodurch eine direkte Bestimmung von β ermöglicht wurde. Als Resultat steigender C_R -Werte und sinkender C_S -Werte wurde ein linearer Anstieg von β mit der Strömungsgeschwindigkeit verzeichnet, wobei β Werte zwischen 158 und 248 annahm. Sie stellten fest, dass von der Abhängigkeit zwischen β und u_m bislang nicht in der Literatur berichtet worden ist.

THOMPSON ET AL. (2004) geben an, dass in Anlehnung an RAUPACH (1992) der Anteil der Sohlenschubspannung am Gesamtwiderstand vernachlässigbar ist, wenn λ größer als 0,03 bis 0,1 ist. Die Untersuchungen von THOMPSON ET AL. (2004) befanden sich im Bereich von $\tau_s/\tau = 0,1 - 0,2$ für Rauheitsdichten $\lambda = 0,03 - 0,09$ und bestätigten experimentell die Theorie von RAUPACH (1992). Letztendlich sehen THOMPSON ET AL. (2004) Gl. (2.38) als ein geeignetes Entwurfsinstrument an. Sie weisen jedoch darauf hin, dass weitere Versuche durchgeführt werden müssen, um die Gültigkeit im wasserbaulichen Versuchswesen zu erweitern und auf natürliche Vegetation zu übertragen.

In Bezug auf den Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtfleißwiderstand berichtete FISCHENICH (1996, 2000), dass die Untersuchungen von FENZL & DAVIS (1964) darauf hinweisen, dass eine Fließtiefe $h \geq 0,1$ benötigt wird, um den Sohlenwiderstand vernachlässigen zu können. FENZL & DAVIS (1964) untersuchten den Beitrag von Oberflächen- und Vegetationswiderstand am Gesamtwiderstand an einem einjährigen Bewuchsfeld bestehend aus einer Luzernenart (alfalfa) und fanden heraus, dass das Verhältnis zwischen Oberflächenrauheit und Gesamtwiderstand von einem Wert $\tau_s/\tau = 0,5$ bei einer Fließtiefe $h = 3,05$ cm auf ein Verhältnis $\tau_s/\tau = 0,07$ bei einer Fließtiefe $h = 6,1$ cm sinkt. FISCHENICH (2000) folgerte daraus, dass die Sohleneigenschaften innerhalb eines Vegetationsfeldes nur bei sehr flachen Strömungen von Bedeutung sind. Weiterhin kann der Sohlenwiderstand vernachlässigt werden, wenn die Vegetation ausreichend dicht ist, wobei keine Maßzahl für die Dichte angegeben wurde.

Die Annahme eines vernachlässigbaren Oberflächenwiderstandes wird in der Literatur von weiteren Autoren getroffen (FREEMAN ET AL. 2000, NEPF 1999, WU ET AL. 1999, und weiteren), wobei nicht immer ein Nachweis über die Gültigkeit dieser Annahme erbracht wird. RIGHETTI (2008) stellte

demgegenüber fest, dass der Anteil der Sohlenschubspannung nicht pauschal vernachlässigbar ist. In seinen Versuchen mit echten flexiblen Pflanzen führte RIGHETTI (2008) Kraftmessungen an bis zu drei Vegetationselementen gleichzeitig durch und bestimmte den Anteil der Sohlenschubspannung am Gesamtwiderstand anhand Gl. (2.7) zu 45%, wobei die Dichte m 1,1 Pflanzen je m^2 betrug. Detaillierte Angaben zu Vegetationsparametern, wie bspw. der Blattfläche oder -masse wurden jedoch nicht gemacht. Diese Feststellung steht im Widerspruch zu vielen einfachen Modellen welche in der Literatur veröffentlicht wurden, bei denen insbesondere für überströmte Verhältnisse vernachlässigbare Sohlenschubspannungen propagiert wurden (u.a. KOUWEN ET AL. 1969, CHRISTENSEN 1985, RAUPACH ET AL. 1996, STEPHAN & GUTKNECHT 2002, RIGHETTI & ARMANINI 2002, KATUL ET AL. 2002, CAROLLO ET AL. 2002).

JORDANOVA & JAMES (2003) stellten in experimentellen Untersuchungen zum Geschiebetransport (Quarzsand, $d_{Sieb,m} = 0,45$ mm) unter dem Einfluss starrer Vegetation fest, dass die Sedimenttransportrate eng mit der Sohlenschubspannung korreliert, wenn Geschiebetransport vorliegt. Der Sohlenwiderstand wurde dabei unter Anwendung des Superpositionsprinzips berechnet, indem der Vegetationswiderstand vom Gesamtwiderstand subtrahiert wurde. Der Einfluss der Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes der Zylinder von der Vegetationsdichte, -anordnung und weiteren Parametern (vgl. 2.2.1.1) auf den Vegetationswiderstand wurde durch die Berechnung des Widerstandsbeiwertes nach dem Verfahren von LI & SHEN (1973) berücksichtigt. Die ermittelte Sohlenschubspannung stieg mit der Fließtiefe bis zu einem Grenzwert an, ab dem ein weiterer Anstieg der Gesamtwiderstandskräfte ausschließlich durch die Vegetation aufgenommen wurde.

In einem Ansatz, die Komplexität der analytischen Beschreibung der Strömung von durchströmter Vegetation zu reduzieren, schlugen TOLLNER ET AL. (1982) eine Analogie zwischen der Fließtiefe h in einem durchströmten Bewuchsfeld mit dem Vegetationsabstand a_y und einem kompakten Rechteckgerinne mit der gleichen Fließtiefe h und der Breite $b = a_y$ vor. Der hydraulischen Radius R_h wird durch einen äquivalenten hydraulischen Radius R_s ersetzt, welcher auf den Abstand zwischen zwei Elementreihen bezogen ist:

$$R_s = \frac{a_y h}{a_y + 2h} \quad (2.43)$$

Damit ergibt sich für die Sohlenschubspannung folgende Gleichung:

$$\tau_0' = \tau_s = \rho g R_s S \quad (2.44)$$

TOLLNER ET AL. (1982) schlugen die Analogie für die Bestimmung des Sedimenttransportes in durchströmten dichten Grasbewuchs vor. Die Sohlenschubspannung ist Eingangsparameter in verschiedenen Sedimenttransportgleichungen. Diese Gleichungen wurden mit Daten aus Versuchen zur Bestimmung des Transportbeginns in durchströmter Vegetation aus starren Zylindern kalibriert. Die Versuche wurden bei versetzter Anordnung und mit Reihenabständen von 9,45 mm, 12,63 mm und 15,83 mm durchgeführt. Der Zylinderdurchmesser wurde nicht genannt. Zwischen den Berechnungsergebnissen der kalibrierten Sedimenttransportgleichungen und dem gemessenen Sedimenttransport in echtem Grasbewuchs wurde eine gute Übereinstimmung festgestellt. TOLLNER

ET AL. (1982) gaben an, dass mit steigendem Reihenabstand a_y die Genauigkeit der Analogie abnimmt. Es blieb jedoch offen, für welche Verhältnisse a_y/d Gl. (2.44) angewendet werden kann.

Bestimmung der Sohlenschubspannung anhand sohlennaher Strömungsgrößen

Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung des Oberflächenwiderstandes der Gerinnesohle in einem Bewuchsfeld basieren auf Messungen des turbulenten sohlennahen Strömungsfeldes. Die Anwendbarkeit der einzelnen Methoden ist dabei an ihre Anwendungsgebiete und Gültigkeitsgrenzen gebunden. Verfügbare Methoden zur Bestimmung der Sohlenschubspannung wurden in BIRON ET AL. (2004) und ROWINSKI ET AL. (2005) diskutiert.

Eine vielfach angewendete Methode (z.B. DVWK 1991, MERTENS 2006 sowie HUAI ET AL. 2009) ist die Annahme einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung über der Sohlenoberfläche. Unter Verwendung des logarithmischen Fließgesetzes kann der Widerstandsbeiwert f' von Darcy-Weißbach wie folgt ausgedrückt werden (vgl. DITTRICH, 1998):

$$\sqrt{\frac{8}{f'}} = 2,5 \ln \frac{h}{k_s} + 6,25 \quad (2.45)$$

mit k_s = äquivalente Sandrauheit.

Die Anwendbarkeit des logarithmischen Fließgesetzes setzt jedoch die Erfüllung einiger Annahmen voraus, die in komplexeren Strömungen nicht immer einzuhalten sind (ROWINSKI ET AL. 2005). Es stellten unter anderem LINDNER (1982), ROWINSKI & KUBRAK (2002) fest, dass in Bewuchsfeldern mit starrer und flexibler Vegetation kein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil vorliegt. Folglich führt die Anwendung zu Unsicherheiten, wobei bislang unklar ist, wie hoch die Abweichungen zu den real vorhandenen Sohlenschubspannungen sind.

Dies gilt auch für den von HUTHOFF (2007) verwendeten Ansatz zur Bestimmung des Fließwiderstandes der Sohlenoberfläche nach STRICKLER (1923), welcher für turbulente Strömungen über rauen Oberflächen angewendet werden kann:

$$\sqrt{\frac{8}{f'}} = 16\sqrt{2} \left(\frac{h}{k_s} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2.46)$$

Auch bei diesem Ansatz führt die Anwendung in Bewuchsfeldern zu Unsicherheiten.

ROWINSKI ET AL. (2005) stellen fest, dass dort wo das logarithmische Fließgesetz nicht angewendet werden kann, nur Methoden, welche auf Turbulenzmessungen basieren, verlässliche Werte für die Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit u_* liefern können. Für 2D-Strömungen kann die Methode der Messung sohlennaher Reynoldsspannungen und für komplexe Strömungen die Methode der Messung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) angewendet werden.

Für zweidimensionale, vollturbulente, offene Gerinneströmungen ist die Schubspannung definiert zu:

$$\tau'_0 = \rho \left(-\overline{u'w'} \right) \quad (2.47)$$

Darin bezeichnet ein Überstrich eine zeitliche Mittelung und der vertikale, angehängte Strich die zeitlichen Fluktuationen vom Mittelwert der longitudinalen und vertikalen Strömungskomponenten u und w .

Die Schwierigkeit der Bestimmung der Schubspannungen nach Gl. (2.47) besteht in der Durchführung detaillierter und präziser sohlennaher Turbulenzmessungen, da die Methode ist sehr sensitiv gegenüber Abweichungen der Ausrichtung der Messinstrumente ist und gegenüber Abweichungen von der Zweidimensionalität des Strömungsfeldes (vgl. BIRON ET AL. 2004 und darin zitierte Veröffentlichungen).

Wenn das turbulente Strömungsfeld in vertikalen Profilen aufgemessen wird, kann die Bestimmung der Sohlenschubspannung durch die Extrapolation der vertikalen Verteilung der Reynoldsspannungen in Richtung Sohle erfolgen (NIKORA & GORING 2000). Bei Einzelpunktmessungen wird hingegen ein sohlennaher Wert verwendet. Hierbei wird offensichtlich, dass sich die Ergebnisse zwischen den Vorgehensweisen unterscheiden können und weiterhin Abweichungen in Abhängigkeit des gewählten Messverfahrens vorliegen können. Dies ist insbesondere zu beachten, wenn die Ergebnisse von Verfahren unterschiedlicher Messvolumengröße miteinander verglichen werden (z.B. LDA, PIV und ADV). BIRON ET AL. (2004) empfehlen die Extrapolation in Richtung Sohle aus einem vertikalen Profil zur Bestimmung der Reynoldsspannungen für einfache zweidimensionale Strömungsverhältnisse.

In komplexen Strömungsfeldern ist die Bestimmung der Sohlenschubspannung nach Gl. (2.47) jedoch nicht notwendigerweise angemessen, da die Korrelation zwischen longitudinalen und vertikalen Strömungskomponenten auch bei nur geringen Turbulenzintensitäten niedrig sein kann (BIRON ET AL. 2004). Dies führt zu Werten nahe Null oder negativen Werten der Reynoldsspannungen. Vergleichsmessungen von BIRON ET AL. (2004) zeigten, dass die Methode der Bestimmung der turbulenten kinetischen Energie TKE am besten in komplexen Strömungsfeldern geeignet ist. Die Beziehung lautet wie folgt:

$$\tau_{TKE} = 0,5C\rho(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.48)$$

Wobei v die transversale Strömungskomponente bezeichnet und der Proportionalitätsfaktor C konstant ist und in ozeanografischen Studien zu $C = 0,19$ bestimmt worden ist (SOULSBY 1983, KIM ET AL. 2000).

Die Beziehung zwischen Sohlenschubspannung und turbulenter kinetischer Energie TKE wurde in ozeanografischen Untersuchungen entwickelt und wird dort vorherrschend angewendet, wobei die Beziehung in offenen Gerinneströmungen bislang nur vereinzelt eingesetzt worden ist. Die Methode ist invariant gegenüber der Ausrichtung des Messgerätes in der Strömung, jedoch ebenso wie die Methode der Bestimmung der Reynoldsspannungen sensibel gegenüber dem Abstand des Messvolumens zur Sohle und der Dimensionen des Messvolumens. Während in ozeanografischen Studien oftmals relativ hohe Abstände des Messvolumens zur Sohle gewählt werden (z.B. KIM ET AL. 2000,

0,14 m; HUTHENANCE ET AL. 2002, 0,30 m), wird bei offenen Gerinneströmungen im Allgemeinen der kleinste mögliche Abstand zwischen Sohle und Messvolumen gewählt, wobei sich das Messvolumen außerhalb der Rauheitsschicht der Sohle befindet. In Anbetracht der Variation der Messwerte des TKE-Verfahrens und der Reynoldsspannungen mit dem Abstand des Messvolumens von der Sohle ist eine Anpassung des Proportionalitätsfaktors für offene Gerinneströmungen erforderlich (BIRON ET AL. 2004). Weiterhin empfehlen BIRON ET AL. (2004) für Einzelpunktmessungen die Positionierung des Messvolumens in einer Höhe von $0,1h$, da Messungen gezeigt haben, dass in dieser Höhe Maximalwerte der Reynoldsspannungen und der TKE auftreten. Sie merken jedoch an, dass es noch fraglich ist, ob diese Höhe unter allen Bedingungen angemessen ist und dass weiterer Forschungsbedarf in diese Richtung besteht. Auch ROWINSKI ET AL. (2005) hielten fest, dass es noch kein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Sohlenschubspannungen basierend auf Turbulenzmessungen gibt.

Die Methode doppelt gemittelter Strömungsgrößen (DAM)

Eine der Schwierigkeiten bei der Beschreibung sohlennaher Strömungsparameter in und über rauen Oberflächen und der Strömungsparameter in Bewuchsfeldern stellt die räumliche Heterogenität der Strömung dar. Anstelle einer einfachen, zeitlichen Mittelung der Strömungsparameter ist es daher zweckdienlicher eine doppelte, d.h. zeitliche und räumliche Mittelung der Navier-Stokes Gleichungen durchzuführen. Die Methode der doppelten Mittelung wurde von WILSON & SHAW (1977) zur Beschreibung durch- und überströmter Bewuchsbestände in atmosphärischen Strömungen eingeführt. RAUPACH & SHAW (1982), FINNIGAN (1985) und RAUPACH ET AL. (1991) lieferten die mathematischen Gleichungen der doppelt gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Der Vorteil der doppelten Mittelung ist die eindeutige Definition grundlegender Konzepte. So werden zum Beispiel global stationär gleichförmige Strömungsverhältnisse definiert, obwohl die lokalen Strömungsparameter in oder nahe der Rauheitsschicht einer räumlichen Variation unterliegen (POKRAJAC ET AL. 2006).

Für zweidimensionale, vollturbulente stationär-gleichförmige Strömungsverhältnisse einer offenen Gerinneströmung lautet die doppelt-gemittelte Navier-Stokes-Gleichung in Strömungsrichtung nach NIKORA ET AL. (2007):

$$\rho\phi gS = f_x - \frac{\partial \phi \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.49)$$

mit

$$\tau_{xz} = \rho \left\langle v \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\rangle - \rho \langle \overline{u'w'} \rangle - \rho \langle uw \rangle \quad (2.50)$$

und f_x = Gesamtwiderstand pro Volumeneinheit, ρ = Fluidichte, ϕ = Porosität.

In den oben genannten Gleichungen bezeichnet ein gerader Überstrich \bar{u} eine zeitliche Mittelung und die winklige Klammer $\langle \rangle$ eine räumliche Mittelung. Entsprechend bezeichnet ein vertikaler,

angehängter Strich u' die zeitlichen Fluktuationen und ein gewellter Überstrich u die räumlichen Fluktuationen, wobei $u' = u - \bar{u}$ und $u = \langle \bar{u} \rangle - \bar{u}$ und u und z die Strömungskomponenten in longitudinaler und vertikaler Strömungsrichtung darstellen.

In Bezug auf die zeitlich gemittelten Reynolds-Gleichungen entstehen durch die räumliche Mittelung zusätzliche Terme. Diese forminduzierten Spannungen $-\rho \langle uw \rangle$ repräsentieren den Impulsfluss, welcher durch die räumliche Heterogenität der zeitlich gemittelten Strömung induziert wird. Die forminduzierten Spannungen werden Teil der Scherspannungen in Gl. (2.50) und Teil des Gesamtwiderstands f_x . Der Gesamtwiderstand f_x repräsentiert die Summe des forminduzierten Widerstandes und des viskosen Widerstandes (MANES ET AL. 2008).

In Bewuchsfeldern mit hoher Vegetationsdichte wurden von POGGI ET AL. (2004) vernachlässigbar geringe forminduzierte Spannungen in der Vegetation festgestellt, wohingegen bei geringen Vegetationsdichten forminduzierte Spannungen gemessen wurden, die Werte von 30% der Gesamtspannungen betrugen. Nicht vernachlässigbare forminduzierte Spannungen wurden auch von RIGHETTI (2008) gemessen.

Da die Analyse des turbulenten Strömungsfeldes nicht im Fokus dieser Arbeit steht, werden bisherige Versuchsergebnisse der DAM-Methode hier nicht vorgestellt. Für weitere Informationen über die Methode der doppelten Mittelung wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. NIKORA ET AL. 2007a und 2007b und zitierte Literatur darin).

2.3 Fazit und abgeleitete Untersuchungsschwerpunkte

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass signifikante Wissensdefizite bei der Bestimmung des Sohlenwiderstandes und des Vegetationswiderstandes in durchströmten Bewuchsfeldern aus flexibler und belaubter Vegetation vorhanden sind. Bislang ist es nicht gelungen, Ansätze zu entwickeln, mit welchen die Bestimmung des Sohlen- und Vegetationswiderstandes in durchströmten Bewuchsfeldern a priori möglich ist. Demgegenüber wird oftmals die Annahme getroffen, dass der Sohlenwiderstand in einem ausreichend dichten Vegetationsfeld vernachlässigt werden kann, wobei kein Kriterium für eine ausreichende Vegetationsdichte vorliegt. Weiterhin führt das Wissensdefizit dazu, dass Annahmen getroffen und Verfahren angewendet werden, deren Randbedingungen nicht eingehalten werden und deren Anwendbarkeit nicht verifiziert wurde.

Das Ziel dieser Untersuchungen ist es daher, den Stand der Forschung zum Sohlen- und Vegetationswiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern aus flexibler, belaubter Vegetation zu erweitern. Dazu werden experimentelle Untersuchungen in einer Versuchsrinne des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig durchgeführt. Die Grundlage dieser Versuche bildet das Kräftegleichgewicht an einem Volumenelement des durchströmten Bewuchsfeldes nach Gl. (2.7). In den Versuchen wird das Prinzip der doppelten Mittelung angewendet, wobei eine zeitliche und räumliche Mittelung der maßgebenden Einflussgrößen durchgeführt wird. Weiterhin werden global

stationär gleichförmige Strömungsverhältnisse vorausgesetzt obwohl die lokalen Strömungsparameter im Bewuchsfeld einer räumlichen Variation unterliegen.

Der Gesamtwiderstand des durchströmten Bewuchsfeldes setzt sich aus dem Sohlenwiderstand und dem Vegetationswiderstand zusammen. Zur Trennung zwischen Sohlen- und Gesamtwiderstand ist es notwendig die Widerstandskräfte auf die Vegetationselemente zu bestimmen. Da zu erwarten ist, dass die Widerstandskräfte der Vegetation in einer räumlich heterogenen Strömung einer gewissen, aber unbekannten räumlichen Variabilität unterworfen sind, ist es notwendig, die Widerstandskräfte mehrerer Vegetationselemente direkt zu bestimmen. Dazu wird in Kapitel 3 ein neuer und innovativer Versuchsaufbau vorgestellt, welcher die simultane Ermittlung der Widerstandskräfte auf bis zu zehn Vegetationselemente ermöglicht, ohne die Strömung zu beeinflussen.

Weiterhin hat die Literaturrecherche gezeigt, dass Pflanzen selbst innerhalb einer Art große Unterschiede in ihren strukturellen Eigenschaften aufweisen und die Vegetationsparameter nur innerhalb eines kurzen Zeitraumes nach dem Beschnitt der Pflanzen konstant bleiben. Beide Eigenschaften sind für systemtische Laboruntersuchungen, die einen hohen zeitlichen Aufwand erfordern und eine nahezu homogene Verteilung der Vegetation voraussetzen, ungeeignet. Es ist daher erforderlich, natürliche durch künstliche Pflanzen zu ersetzen. JÄRVELÄ (2006) wies darauf hin, dass künstliche Vegetationselemente nicht notwendigerweise ein vergleichbares Widerstandsverhalten aufweisen müssen wie ihre natürlichen Gegenstücke. In der Literatur konnten jedoch weder Hinweise über die erforderlichen Eigenschaften künstlicher Vegetation, noch über die Durchführung von Messungen zur Überprüfung der Eignung von künstlichen Vegetationselementen gefunden werden. In Kapitel 4 werden daher zunächst Versuchsreihen mit dem Ziel durchgeführt, ein künstliches Vegetationselement zu identifizieren, dessen Widerstandsverhalten mit natürlicher Vegetation vergleichbar ist.

Mit dem künstlichen Vegetationselement werden die Hauptuntersuchungen im Bewuchsfeld durchgeführt. Für Vergleichszwecke zu bestehenden Arbeiten werden weiterhin starre Zylinder mit einem Durchmesser $d = 1$ cm verwendet, da ein Großteil der in der Literatur veröffentlichten Untersuchungen mit starrer Vegetation durchgeführt wurden.

Die Literaturrecherche zeigte, dass der Sohlen- und Vegetationswiderstand in Bewuchsfeldern von verschiedenen Parametern abhängig ist. Diesbezüglich wird in den Versuchen eine systematische Variation der unterschiedlichen Einflussfaktoren durchgeführt. Sohlen- und Vegetationswiderstand werden in Abhängigkeit von

- der Vegetationsdichte, –anordnung,
- der Sohlenrauheit,
- der relativen Fließtiefe h/H und
- der vertikalen Blattflächenverteilung untersucht.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen zum Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern werden mit bestehenden Ansätzen zu Bestimmung des Sohlenwiderstandes verglichen.

Die Literaturstudie zeigte weiterhin, dass eine adäquate Parametrisierung der Widerstandsbeziehung natürlicher Vegetation bis heute nicht gelungen ist und auch weiterhin im Fokus zukünftiger Untersuchungen steht. Zur Entwicklung von Widerstandsbeziehungen natürlicher, flexibler Vegetation besteht die Notwendigkeit, Vegetation über ihre vegetationsspezifischen Eigenschaften zu parametrisieren und diese in Verbindung mit dem Widerstandsverhalten zu bringen. Die Beziehungen zwischen Vegetationsparametern und Widerstandskräften sind jedoch äußerst komplex und werden noch nicht gut verstanden. Vielversprechend ist jedoch die Verwendung von allometrischen Beziehungen, die bislang noch nicht in der Entwicklung von Widerstandsbeziehungen berücksichtigt worden sind.

Ein vielversprechender Ansatz zur Berücksichtigung des Laubes kann aus den Untersuchungen von WILSON ET AL. (2008) abgeleitet werden. WILSON ET AL. (2008) stellten ein konstantes Verhältnis zwischen den Widerstandskräften im be- und entlaubten Zustand an einem Efeuzweig fest. Vergleichbare Messergebnisse sind bislang in der Literatur nicht dokumentiert. Dieser Sachverhalt wird in der vorliegenden Arbeit mit Büschen und Bäumen anhand von Kraftmessungen in einem Schleppkanal überprüft.

3 Versuchseinrichtungen

Zur Untersuchung der in Abschnitt 2.3 abgeleiteten Untersuchungsschwerpunkte werden die verwendeten und entwickelten Versuchseinrichtungen, welche bei den Versuchen eingesetzt worden sind, im Folgenden beschrieben.

Das wesentliche Element der verwendeten Versuchseinrichtungen stellt das neu entwickelte Messgerät zur Ermittlung der auf die Vegetationselemente wirkenden Strömungskräfte dar (Abschnitt 3.1). Das Kraftmessgerät ist Bestandteil weiterer Versuchseinrichtungen, wie der Versuchsrinne (Abschnitt 3.2) und des Strömungskanals (Abschnitt 3.4) und wird daher zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben und in den Folgeabschnitten darauf verwiesen. Die Unterwasserfotokamera, mit der die frontal angeströmten Fläche aufgenommen werden kann, ist zusammen mit einer exemplarischen Bildauswertung in Abschnitt 3.3 beschrieben. Weiterhin wurde ein Schleppkanal der spanischen Versuchsanstalt CEHIPAR bei Madrid für Versuche mit bis zu sechs Meter hohen Bäumen genutzt (Abschnitt 3.5).

3.1 Kraftmessgeräte

Für die direkte Messung der Strömungskräfte auf die Vegetationselemente wurde ein neues Kraftmessgerät (drag force measurement system, DFS) entwickelt. Dieses speziell auf die zu erwartenden Kräfte, die maximalen Platzverhältnisse in der Versuchsrinne und den besonderen Anforderungen bei einer Messung im Wasser abgestimmte Messgerät basiert auf den in WILSON ET AL. (2005, 2008) beschriebenen Messprinzip. Die Neuentwicklung umfasst die konstruktive Gestaltung und die Dimensionierung der einzelnen Komponenten sowie die Programmierung der Datenerfassung und -verarbeitung.

3.1.1 Funktionsprinzip und Aufbau

Das Messprinzip beruht auf der Messung von Dehnungen an den Außenseiten eines Biegebalkens mittels Dehnungsmessstreifen (DMS). Das in Abb. 3.1 dargestellte Messgerät besteht aus einem 140 mm langen, 20 mm breiten und 3 mm dicken gewalztem Flachstahl aus Edelstahl (X5 Co-Ni 18-10). Der Flachstahl ist biegesteif mit einer Kopf- und einer Fußplatte aus Aluminium verbunden. Während die Fußplatte an der Sohle fixiert ist, kann sich der Biegebalken zusammen mit der Kopfplatte in Strömungsrichtung frei bewegen. Ein Vegetationselement wird über eine Steckverbindung, bestehend aus einer Bohrung in der Kopfplatte und einem Messingrohr, in welches das Element eingeklebt wird, am Messgerät fixiert. Dadurch kann das Vegetationselement schnell und einfach ausgetauscht werden. Eine kraftschlüssige Verbindung wird durch eine passgenaue Bohrung gewährleistet.

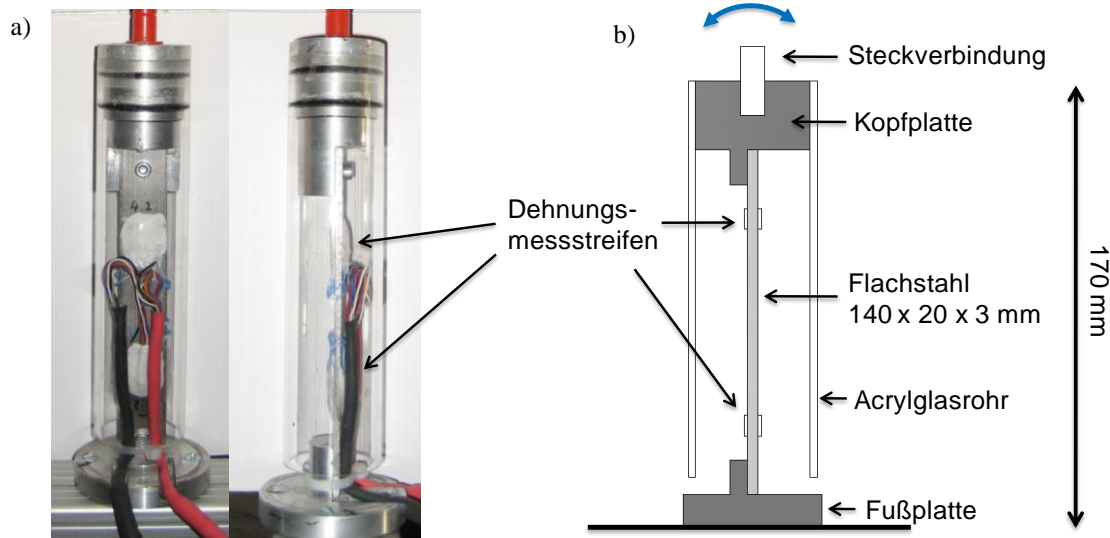


Abb. 3.1 Ansicht eines Kraftmessgerätes in und quer zur Strömungsrichtung (a) und eine Prinzipskizze quer zur Strömungsrichtung (b).

In Abb. 3.2 ist eine weitere Prinzipskizze des Kraftmessgerätes im Messbereich der Versuchsrinne (vgl. Abschnitt 3.2) dargestellt. Wirken auf das dargestellte Vegetationselement Strömungskräfte, dann werden diese direkt auf den Edelstahlstab, der sich wie ein Kragarm verhält, übertragen und erzeugen dort Zug- und Druckspannungen σ . Diese werden als Dehnungen und Stauchungen ε auf den Oberflächen direkt von den DMS gemessen. Dazu sind insgesamt vier doppelte, einachsige messende, DMS auf der Mittelachse des Edelstahlstabes im Abstand l an den Positionen 1 und 2 aufgeklebt. Die aktiven DMS von Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. (Typ FLA-3-350-C4-17) sind zu zwei Wheatstone Vollbrücken verschaltet. Jede Wheatstone Vollbrückenschaltung ist über ein Kabel an einen Messverstärker von National Instruments angeschlossen (NI DAQmx 9237). Diese Schaltung hat den Vorteil, dass Normalkräfte und temperaturinduzierte Dehnungen im Edelstahlstab kompensiert werden (HOFFMANN, 1987). Weiterhin werden Störeinflüsse durch brückeninterne Verbindungen weitestgehend unterdrückt und ein 3-Kabel-System bewirkt eine Kompensation von Temperatureinwirkungen auf die Kabel der Brückenschaltung. Um die DMS vor Feuchtigkeit zu schützen ist ein Acrylglasrohr luftdicht an der Kopfplatte befestigt. Das untere Ende des Rohres ist offen. Dort kann in Abhängigkeit des hydrostatischen Druckes Wasser eintreten bis ein Gleichgewicht zwischen Wasserdruck und Luftdruck im Rohr erreicht wird. Eine zeitgesteuerte Luftzufuhr gleicht Verluste durch die Kabelverbindungen aus und verhindert ein Ansteigen des Wasserstandes im Rohr über ein kritisches Maß von ca. 0,5 cm. Die Datenerfassung der bis zu zehn Kraftmessgeräte erfolgt über die grafische Programmierungsumgebung LabVIEW (Version 8.2).

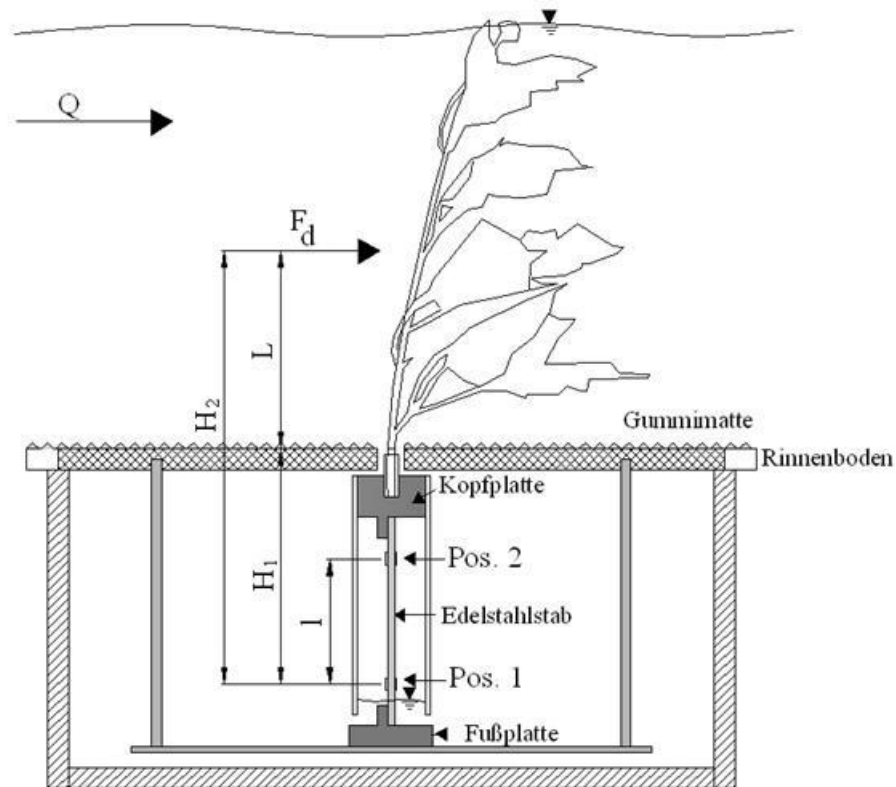


Abb. 3.2 Prinzipskizze des Kraftmessgerätes im Messbereich der Versuchsrinne

Für die Ermittlung der Kräfte werden die Längenänderungen unter Kenntnis des Elastizitätsmoduls E des Flachstahles zunächst in Normalspannungen σ umgerechnet. Nach KEIL (1995) gilt für Wheatstone Vollbrücken:

$$\sigma = 0,25 \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2.51)$$

Die entsprechenden Biegemomente M können anhand der Beziehung

$$M = \sigma \cdot W \quad (2.52)$$

mit $W = \text{Widerstandsmoment} = b_s h_s^2 / 6$, $b_s = \text{Stabbreite}$, $h_s = \text{Stabdicke}$ berechnet werden.

Die Kenntnis der Biegemomente M_1 und M_2 ermöglicht die Bestimmung des Betrags der resultierenden Strömungskraft F_D und des zugehörigen resultierenden Hebelarmes H_2 .

$$F_D = \frac{M_1 - M_2}{l} \quad (2.53)$$

$$H_2 = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (2.54)$$

Bei gegebenem Abstand H_1 zwischen der unteren Wheatstone Vollbrücke und der Oberkante der Sohle kann der Hebelarm L als Abstand von der Sohlenoberfläche mittels der Beziehung $L = H_2 - H_1$ berechnet werden.

3.1.2 Kalibrierung

Für die Bestimmung von F_D und H_2 werden sowohl die Materialeigenschaften des Edelstahlstabes ($E = 200 \text{ N/mm}^2$), als auch die geometrischen Abmessungen H_l , b , h und l benötigt. Während H_l durch Messungen genau bestimmt werden kann und die Genauigkeit von b relativ unempfindlich auf die Messgenauigkeit ist, haben h und l einen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Eine Abweichung der Materialstärke h zwischen den Positionen 1 und 2 in der Größe $\Delta h = 0,01 \text{ mm}$ (0,3 %) bewirkt eine Differenz der berechneten Momente zwischen den Positionen 1 und 2 in der Größenordnung von 0,67 %. Weil sich diese Differenz linear auf die Berechnung der Kräfte auswirkt, wurde im Rahmen der Kalibrierung der Messgeräte ein Korrekturfaktor k eingeführt. Im Zuge der Kalibrierung wurden die horizontal angeordneten Kraftmessgeräte mit Gewichten (50, 100, 200g) in Abständen L (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 und 18cm) belastet und die bekannten und berechneten Kräfte wurden gegeneinander aufgetragen. Bei einer perfekten Übereinstimmung fällt die ermittelte Gerade auf die Winkelhalbierende. Bei Abweichungen wird eine Korrektur des Biegemomentes an der Position 1 über den Faktor k wie folgt durchgeführt:

$$M_1 = \frac{\sigma_1 W_1}{k} \quad (2.55)$$

Der Abstand l zwischen den Vollbrücken bezeichnet den mittleren Abstand zwischen den DMS an den Positionen 1 und 2 und kann aufgrund der Anordnung der Vollbrücken mit jeweils einer doppelten DMS auf der Vorder- und Rückseite nicht exakt gemessen werden. Deshalb erfolgt die genaue Bestimmung des Abstandes ebenfalls anhand des beschriebenen Kalibriervorganges, wobei der Abstand über Gl. (2.53) berechnet wurde. Der Abstand H_l wurde im Anschluss durch eine Messung mit dem Hebelarm $L = 0$ bestimmt und die Differenz zwischen Kopfplatte und Sohlenoberfläche anhand eines Messschiebers ermittelt.

Im Anschluss an die Kalibrierung wurde die Güte der DFS durch eine Versuchsreihe überprüft bei denen die DFS in einer horizontalen Position, analog zu den Kalibriermessungen, ausgerichtet waren. Ein an die Messgeräte angebrachter starrer Zylinder wurde mit bekannten Gewichten (2, 5, 10, 20, 50, 70, 100, 150, 200g) bei einem konstanten Abstand $L = 10 \text{ cm}$ belastet. Die Messungen wurden mit einer Datenrate von 200 Hz und einer Messdauer von 60s durchgeführt. In Abb. 3.3 sind die Ergebnisse der Bestimmung der maximalen Abweichung zwischen gemessener und applizierter Kraft in Abhängigkeit der applizierten Kraft für DFS01 bis DFS10 dargestellt.

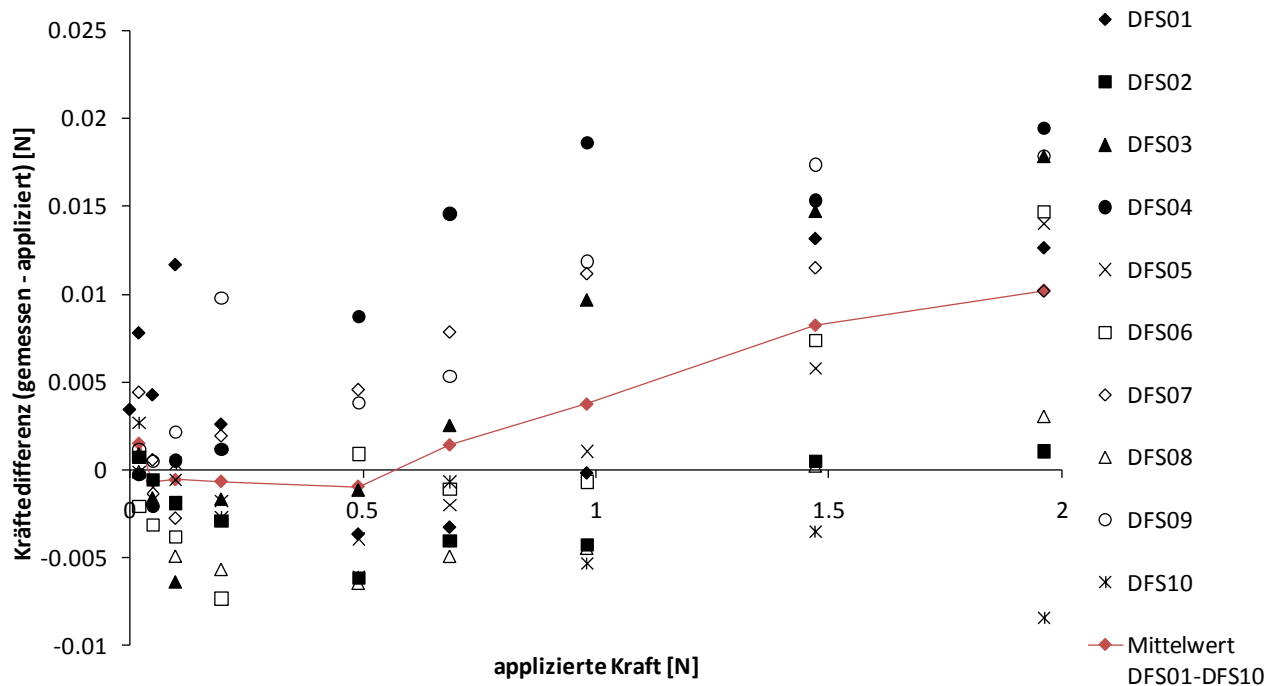


Abb. 3.3 Differenz zwischen gemessener und applizierter Kraft in Abhängigkeit der applizierten Kraft.

Die Abbildung zeigt zudem den Mittelwert der Abweichungen der zehn Kraftmessgeräte. Mit Ausnahme des Mittelwertes bei $F_D = 0,02$ N ist der Mittelwert der gemessene Kraft bis zu einer applizierten Kraft von $F_D = 0,5$ N geringfügig niedriger als die aufgebrachte Kraft. Für $F_D \geq 0,7$ N ist die gemessene Kraft höher als die aufgebrachte, wodurch die applizierten Kräfte geringfügig überschätzt werden. Die absoluten Kräftedifferenzen der einzelnen DFS befindet sich zwischen -0,0084 N und +0,02 N und die Kräftedifferenz des Mittelwertes der zehn Messgeräte befindet sich zwischen -0,001 N und +0,01 N. Die mittlere prozentuale Abweichung von der applizierten Kraft ist mit +7,67% am Höchsten für die geringste applizierte Kraft $F_D = 0,02$ N. Bei einer applizierten Kraft $F_D = 1$ N beträgt die Abweichung der gemessenen Kraft im Mittel 0,38 % der applizierten Kraft. Insgesamt wird eine sehr hohe Genauigkeit erreicht.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind tabellarisch im Anhang in Tabelle Tab.A 1 dargestellt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass bei steigender Belastung der Standardfehler und die Standardabweichung nahezu konstant sind (vgl. Anhang Abb. A 1 und Abb. A 2).

Bei einer Versuchsreihe zur Untersuchung der elastischen Nachwirkung des Flachstahles wurde mit einer Belastung $F = 1.02$ N und $L = 10$ cm nach vier Stunden Versuchsdauer eine Abweichung von der Eingangsbelastung in der Höhe von +0,038 N gemessen. Nach Entlastung des Kraftmessgerätes und weiteren fünf Stunden Versuchsdauer betrug die Abweichung vom Sollwert noch vernachlässigbar geringe +0,0023 N. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die Kraftmessungen in den Hauptversuchen zur Bestimmung des Vegetationswiderstandes grundsätzlich zu Beginn der Versuche durchgeführt, um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die elastische Nachwirkung auszuschließen.

Weitere Berechnungen, die auf der Annahme einer linear elastischen Spannungs-Dehnungskurve basieren, führten zu dem Ergebnis, dass die Elastizitätsgrenze des Flachstahles bei einem Biegemoment von 5.7 Nm erreicht ist. Dies entspricht einer Kraft $F = 15 \text{ N}$ bei einem Hebelarm $L = 20 \text{ cm}$. Dieser theoretische Grenzwert wird in den Versuchen bei zu erwartenden Kräften von bis zu 2 N nicht überschritten.

Die Abtastfrequenz der DMS durch den Messverstärker (National Instruments DAQmx 9237) ist variabel zwischen 1613 Hz und 50 kHz je Kanal einstellbar. Eine Reduzierung der Abtastfrequenz auf 200 Hz erfolgte softwarebasiert. Damit ist eine mehr als ausreichend hohe Datenrate zur Erfassung von Schwingungen der Vegetationselemente vorhanden.

3.2 Versuchsrinne

Die Versuchsreihen zur Bestimmung der Sohlenschubspannung im durchströmten Bewuchsfeld (vgl. Kapitel 5) wurden in einer 32 m langen, 0,6 m breiten und 0,4 m tiefen rechteckigen Versuchsrinne in der Versuchshalle des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau durchgeführt, die innerhalb eines Neigungsbereichs zwischen -1,0 % und +4,0 % stufenlos verstellbar ist. Aufgrund des hohen Neigungsbereiches wurde der Durchfluss dem 2 m langen Einlaufbereich über ein unter dem Boden der Versuchsrinne durchlaufendem Rohr zugeführt, welches fest mit der Versuchsrinne verbunden war. Der Durchfluss wurde an der Stirnseite der Versuchsrinne in den Einlaufbereich eingeleitet und wurde durch zwei hintereinander angeordnete Strömungsgleichrichter bestehend aus 45 cm langen, quadratischen Kunststoffprofilen mit einer Kantenlänge von 6 cm und 30 cm langen Kunststoffrohren mit einem Innendurchmesser von 30 mm beruhigt. Um Wellenbildung zu verhindern wurde eine Styropor-Platte auf die Wasserspiegeloberfläche aufgelegt. Der Durchfluss wurde mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser (IDM) gemessen, über einen Zeitraum von 60 Sekunden gemittelt und auf einem PC aufgezeichnet.

Der **Messbereich** (vgl. Abb. 3.4) in welchem Kraft- und Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden, befand sich 15,2 m unterstrom des Einlaufbereichs und bestand aus einem 1,5 m langen, 0,6 m breiten und 0,2 m tiefem Behälter mit einem doppelten Boden. Der doppelte Boden setzte sich aus einer Kunststoffplatte, die den gesamten Messbereich bedeckte und bündig mit der Sohle der Versuchsrinne abschloss, und einer Aluminiumplatte, die im Abstand von 16 cm hängend an der Kunststoffplatte befestigt war, zusammen. Die Kraftmessgeräte wurden auf der Aluminiumplatte über eine Schraubverbindung befestigt. Die Ausrichtung der DFS erfolgte über einen speziellen Aufsatz für die Fußplatte der DFS, der eine exakt rechtwinklige und reproduzierbare Ausrichtung zur Versuchsrinne gewährleistete. Die insgesamt 20 Kabel der DFS und der Belüftungsschlauch der Kraftmessgeräte wurden gebündelt durch ein Rohr in einer der Stirnseiten des Behälters nach außen geführt. Bei einer Veränderung der Vegetationsanordnung konnte der doppelte Boden zusammen mit den DFS nach oben aus der Versuchsrinne herausgehoben werden. Bei jedem Umbau der Vegetationsanordnung wurde eine Funktionsprüfung der Kraftmessgeräte durchgeführt.

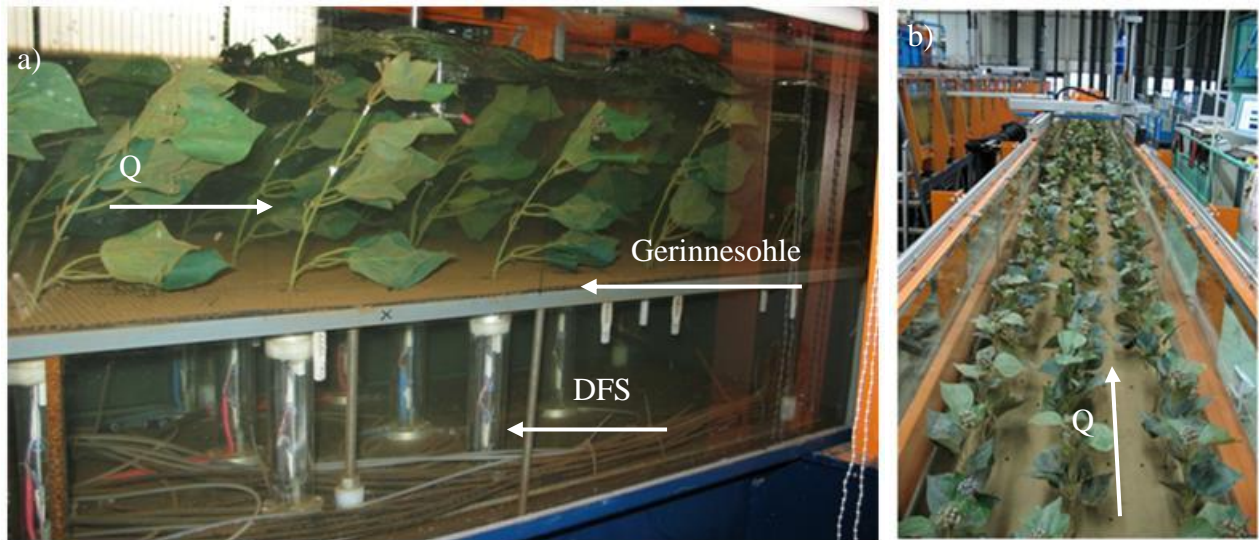


Abb. 3.4 Messbereich der Versuchsrinne (a) und Versuchsrinne mit Blick in Strömungsrichtung (b) bei einer Vegetationsdichte $a_x = a_y = 20\text{cm}$

Die Vegetationselemente erstreckten sich in den Versuchen im Bewuchsfeld über eine Gesamtlänge von 18 m, wobei das Bewuchsfeld 10 m vor der Mitte des Messbereichs begann und 6,5 m dahinter endete. Im Bereich des Bewuchsfeldes wurde zur Befestigung der Vegetationselemente eine 3 cm hohe Ersatzsohle in die Versuchsrinne eingebaut, in welcher Bohrungen im Raster der zu untersuchenden Vegetationsanordnung und -dichte eingelassen waren. Für die Versuche mit starren Zylindern wurden die Zylinder direkt in die Bohrungen gesteckt. Bei Versuchen mit flexibler Vegetation wurden die Bohrungen mit Dübeln versehen, in denen die Vegetationselemente fixiert wurden (vgl. Abb. 3.4).

Die Versuchsrinne wurde im Bereich des Bewuchsfeldes mit einer rauen und einer glatten Gummimatte beklebt, wobei die Rauheit der rauen Matte durch 3 mm hohe, pyramidenförmige Rauheitselemente erzeugt wurde und die glatte Gummimatte keine Rauheitselemente aufwies (vgl. Abb. A 10).

Die **Wasserspiegellagenneigung** S wurde über die Messung der Wasserspiegellage anhand von zehn kommunizierenden Röhren bestimmt. Die Druckanbohrungen waren in den Abständen 8,9, 10,9, 12,9, 13,9, 14,9, 15,9, 16,9, 17,9, 18,9 und 20,9 m vom Rinneneinlauf mittig in der Sohle der Versuchsrinne angeordnet. Die Druckhöhen wurden in den kommunizierenden Röhren mittels eines Spitzentasters abgelesen. Die Wiederholgenauigkeit der Spitzentasterablesung betrug 0,1 mm. Die Wassertiefe h wurde aus den Wasserspiegellagenmessungen durch Subtraktion der neigungsabhängigen Sohlenhöhe berechnet und über die Länge der mit Vegetationselementen bestückten Versuchsrinne gemittelt. Aus der mittleren Wassertiefe h und dem Durchfluss Q wurde die querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit u_m bestimmt. Stationär gleichförmige Strömungsverhältnisse wurden durch die Anpassung der Sohlenneigung, des Durchflusses und der Wassertiefe hergestellt, wobei die Wassertiefe durch eine Wehrklappe im Abstand von 25,5 m vom Einlaufbereich geregelt wurde.

Turbulenz und Geschwindigkeitsmessungen wurden mit einem Acoustic-Doppler-Velocimeter (ADV) von Nortek AS durchgeführt. Datenrate (25 Hz) und Höhe (9 mm) des Messvolumens blieben innerhalb des gesamten Versuchsprogramms konstant. Der vertikale Abstand des Messvolumens zur Sonde betrug 5 cm. Der ADV war an einer 3D-Traversierungseinrichtung angebracht. Die Steuerung der Traversierung erfolgte über einen PC. Die ADV-Daten wurden mit dem Programm WinADV (WAHL, 2000) analysiert. ADV-Signale mit Korrelationsraten $< 70\%$ wurden verworfen. Die Schwellenwert Methode von GORING & NIKORA (2002) wurde angewendet, um mutmaßliche Spikes zu entfernen.

Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden unter Normalabflussbedingungen, welche durch die Regulierung des Durchflusses, der Wehrklappe und der Rinnenneigung eingestellt und durch die Ablesung der Piezometer kontrolliert wurde, durchgeführt. Für die Kraftmessungen wurde zunächst eine Offset-Bestimmung der einzelnen Vollbrücken der DFS durchgeführt und im Anschluss eine Nullmessung ohne Vegetationselemente vorgenommen, um die Güte der Offsetmessung zu überprüfen. Die Kraftmessungen, bestehend aus drei Einzelmessungen mit einer Dauer von je 60 s, wurden zu Beginn der Versuchsreihe durchgeführt. Während der anschließenden Geschwindigkeitsmessungen wurden weitere Kraftmessungen durchgeführt. Im Anschluss an die ADV-Messungen wurden die Fotos zur Bestimmung der angeströmten Fläche mit der Unterwasserkamera aufgenommen. Nach Beendigung der Versuchsreihen wurde die Funktionsfähigkeit der Kraftmessgeräte erneut überprüft. Während der gesamten Versuchsdauer wurde der Durchfluss aufgezeichnet und in regelmäßigen Abständen die Wasserspiegellage kontrolliert.

3.3 Unterwasserkamera

Für die Bestimmung der angeströmten Fläche A_p der Vegetationselemente wurde ein kompaktes Unterwassergehäuse für eine Digitalkamera des Modells UEye UI-2230RE-M von IDS hergestellt (Abb. 3.5a). Das Unterwassergehäuse besteht aus einem 28 cm langen Acrylglasrohr mit einem Durchmesser $d = 7$ cm, welches an den Enden mit Acrylglasplatten verschlossen wurde. Im hinteren Bereich des Acrylglasrohres wurde ein Stahlrohr ($d = 35$ mm) in senkrechter Position befestigt. Das Stahlrohr dient als Halterung für das Unterwassergehäuse und führt die Verlängerung der Brennweiten- und Schärferegulierung nach außen. Die monochrome Digitalkamera hat eine Auflösung von 1024x768 Bildpunkten und ist mit einem Vario-Objektiv (Modell Lensagon CVM 45100) bestückt. Zur Reduzierung des erforderlichen Abstandes zwischen den Vegetationselementen und der Digitalkamera wurde die Kamera um 90 Grad gedreht und Fotos im Hochkant-Format angefertigt. Mit der geringsten Brennweiteneinstellung von 4 mm ergibt sich ein erforderlicher Abstand zu einem 25 cm hohen Objekt unter Berücksichtigung der Brennweitenverlängerung unter Wasser zu ~28 cm. Die Durchführung der Fotografien der einzelnen Vegetationselemente erfolgte,

zur Reduzierung des Einflusses der Kamera auf die Anströmung der Vegetationselemente, entgegen der Strömungsrichtung. Die Unterwasserkamera wurde horizontal in die Strömung getaucht und ungefähr in Höhe der halben Fließtiefe arretiert. Der reale Abstand wurde in den Versuchen je nach Anforderung individuell angepasst. Bei jedem Vegetationselement wurde ein vertikaler Maßstab auf Höhe des Vegetationselementes kurzzeitig in die Strömung hineingehalten, ohne die angeströmte Fläche der Vegetationselemente dabei zu beeinflussen. Mit diesem Maßstab konnte die frontal projizierte Fläche mit dem Bildbearbeitungsprogramm „DatInf[®]Measure“ bestimmt werden. In Abb. 3.5 ist eine Seitenansicht der Unterwasserkamera und beispielhaft eine Auswertung mit dem Programm „DatInf[®]Measure“ dargestellt. Eine Validierung der Messgenauigkeit der angeströmten Flächen wurde durch eine Referenzmessung mit einem starren Zylinder durchgeführt. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen berechneten Werten war nahezu perfekt.

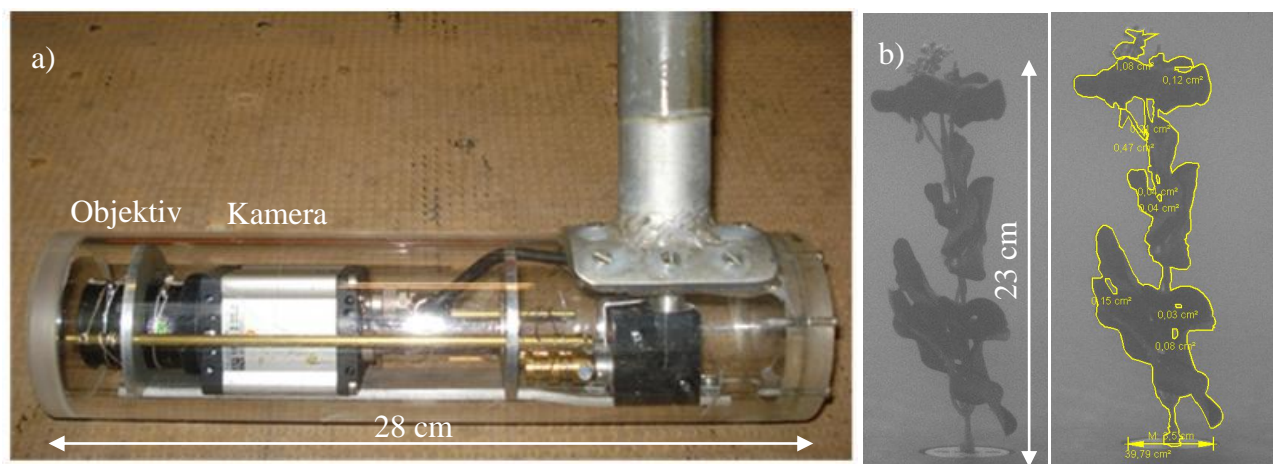


Abb. 3.5 (a) Seitenansicht der Unterwasserkamera und (b) Bestimmung der angeströmten Fläche A_p mit der Software „DatInf[®]Measure“ am Beispiel eines künstlichen Pappelzweiges bei einer Strömungsgeschwindigkeit $u_m = 0,49$ m/s.

3.4 Strömungskanal

Versuchsreihen zur Bestimmung des Widerstandsverhaltens von Einzelelementen wurden in einem geschlossenen Strömungskanal des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau durchgeführt. Der Strömungskanal hat die Form einer Superellipse und besteht aus einem 20 m langen Kunststoffrohr mit einem Rohrdurchmesser $d = 19$ cm (vgl. Abb. 3.6a). Die mittlere Fließgeschwindigkeit wird über einen kalibrierten drehzahlgesteuerten Propeller eingestellt. Der Messbereich besteht aus einem Acrylglasbehälter (0,6 m hoch, 0,5 m lang) und ist 16 m hinter dem Propeller angeordnet. Innerhalb dieses Behälters ist das Rohr an der Oberseite mit einer Öffnung versehen, durch welche die Vegetationselemente in die Rohrströmung getaucht werden können (vgl. Abb. 3.6b). Dazu wurden die Vegetationselemente zusammen mit dem Kraftmessgerät auf dem Kopf stehend an einer Hilfskonstruktion am Acrylglasbehälter befestigt und in vertikaler Position justiert. Bei einer Modifikation des Vegetationselementes konnte das Kraftmessgerät zusammen mit dem Vegeta-

tionselement aus dem Behälter entfernt werden, um an der gleichen Position anschließend wieder befestigt zu werden.

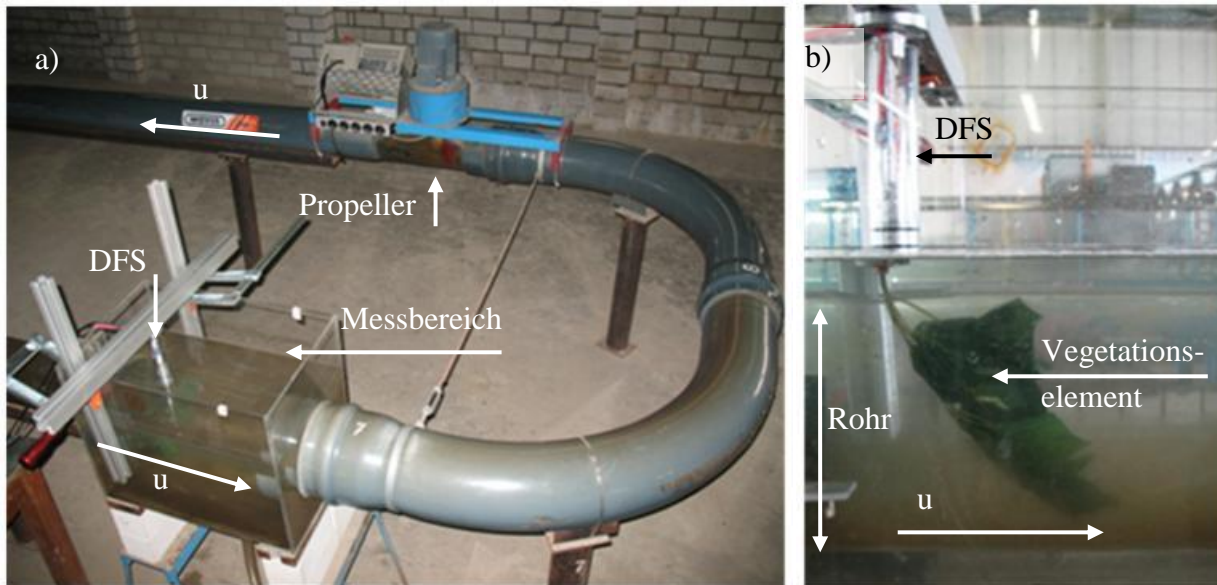


Abb. 3.6 (a) Geschlossener Strömungskanal mit Propellerantrieb und Messbereich incl. Aufbauten. (b) Ansicht des Messbereichs mit über Kopf montiertem DFS und Vegetationselement unter Strömungseinfluss.

Versuchsdurchführung

Das Kraftmessgerät und das Vegetationselement wurden zusammen an der Halterung der Hilfskonstruktion befestigt und ausgerichtet. Im ruhenden Wasser des Strömungskanales wurden eine Offsetbestimmung und anschließend eine Nullmessung durchgeführt. Anschließend wurde die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit am Steuerungsgerät des Propellers eingestellt und eine Zeitdauer von 5 Minuten abgewartet, damit sich die Strömungsgeschwindigkeit vollständig im Kreislauf ausbilden kann. Danach wurden die Kraftmessungen durchgeführt. Bei einem Wechsel des Vegetationselementes wurde jeweils eine neue Offset und Nullmessungen bei ruhender Strömung durchgeführt.

3.5 CEHIPAR Schleppkanal

Zur Untersuchung des Einflusses des Laubes auf die Widerstandskraft bei Bäumen und Sträuchern wurden Versuchsreihen in einem Schleppkanal durchgeführt. Der Schleppkanal der spanischen Versuchsanstalt CEHIPAR (Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo) bei Madrid hat eine Länge von 320 m, ist 12,5 m breit und 6,5 m tief. Er besteht aus dem Becken und einer Messbrücke, welche auf Schienen über den Kanal mit Geschwindigkeiten zwischen 0 und 8 m/s mit einer Genauigkeit von 1 mm/s fahren kann. Die Messbrücke beherbergt einen Messcontainer und ein sechskomponentiges Kraftmessgerät, welches die Kräfte in longitudinaler (F_x), transversaler (F_y) und vertikaler Richtung (F_z) mit einer Genauigkeit von 0,0098 N bei einer Datenrate von 10 Hz

messen kann. Weiterhin können auch die Momente M_x , M_y , M_z berechnet werden. Schleppkanal, Messbrücke und Messcontainer sind in Abb. 3.7 dargestellt.

Die Messung der Widerstandskräfte konnte in beide Fahrtrichtungen (Hin- und Rückfahrt) erfolgen, wobei das Vegetationselement am Ende des Schleppkanals um 180° gedreht worden ist. Für die Messung der Widerstandskräfte wurden die einzelnen Vegetationselemente auf dem Kopf stehend in das Kraftmessgerät eingespannt (vgl. Anhang Abb. A 5). Eine Prinzipskizze des Messgerätes und eine Fotografie der Spannvorrichtung zur zentrischen Befestigung des Stammes des Vegetationselementes sind im Anhang in den Abbildungen Abb. A 3 bis Abb. A 5 dargestellt.



Abb. 3.7 (a) Ansicht des CEHIPAR Schleppkanals in Fahrtrichtung der Hinfahrt und (b) Messbrücke mit Messcontainer während einer Rückfahrt.

Aufgrund der hohen Gesamtlänge des Schleppkanales mit 320 m war es möglich, während einer Fahrt die Fahrgeschwindigkeit schrittweise zu erhöhen und somit die Kräfte auf die Vegetationselemente bei bis zu sechs Geschwindigkeiten in einer Fahrt zu messen (vgl. Anhang Abb. A 6). Die Analyse des kumulativen Mittelwertes ergab, dass eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 20 Sekunden (vgl. WILSON ET AL. 2010 und XAVIER ET AL. 2010) zur Bildung eines repräsentativen Mittelwertes der Widerstandskräfte ausreichend ist.

Insgesamt wurden die Widerstandskräfte auf 22 Bäume unterschiedlicher Arten (*Salix sp.*, *Alnus glutinosa* und *Populus alba*) gemessen (vgl. WILSON ET AL. 2010). Für eine Parametrisierung der Widerstandsbeziehungen wurden die Eigenschaften der Bäume, getrennt in hölzerne Baumteile und Blattanteile, ermittelt. Dazu wurden die Bäume entsprechend ihrer Höhe in Viertel aufgeteilt. Die Pflanzeigenschaften beinhalteten die Pflanzenhöhe, Stammdurchmesser, Masse und Volumen sowie die Masse und das Volumen der Blätter (vgl. XAVIER 2010).

Die Versuchsreihen wurden im März und April des Jahres 2008 im Rahmen des EU-Förderprogrammes HYDRALAB III in Kooperation mit der Cardiff University (UK) und der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Die Projektpartner/-innen waren Dr. Catherine Wilson, Dr. Patricia Xavier, Dr. Jochen Aberle, Dr. Hans-Peter Rauch und Walter Lammeranner.

4 Vergleichbarkeit zwischen künstlicher und natürlicher Vegetation und Einfluss der Blattfläche auf den Vegetationswiderstand

Für Versuche, die unter konstanten vegetationsspezifischen Randbedingungen durchgeführt werden, ist es notwendig, natürliche durch künstliche Vegetation zu ersetzen. In der Literatur konnten jedoch weder Hinweise über die erforderlichen Eigenschaften künstlicher Vegetation, noch über die Durchführung von Messungen zur Überprüfung der Eignung von künstlichen Vegetationselementen gefunden werden. Da künstliche Vegetationselemente nicht notwendigerweise ein vergleichbares Widerstandsverhalten aufweisen wie ihre natürlichen Gegenstücke, werden Versuchsreihen zur Auswahl eines künstlichen Elementes durchgeführt, deren Ergebnisse in Abschnitt 4.1 beschrieben werden.

Weiterhin ist aus der Literaturrecherche deutlich geworden, dass Laub die Widerstandskraft signifikant beeinflusst. Abschnitt 4.2 beinhaltet Untersuchungen, in denen der Einfluss des Laubes auf den Vegetationswiderstand an dem ausgewählten künstlichen Vegetationselement (Abschnitt 4.2.1), den natürlichen Gegenstücken (Abschnitt 4.2.2) und natürlichen Bäumen und Sträuchern (Abschnitt 4.2.3) untersucht wird.

4.1 Auswahl eines künstlichen Vegetationselementes

Um ein geeignetes Vegetationselement zu identifizieren, wurden zunächst qualitativ verschiedene Elemente nach den Kriterien, Form und Flexibilität der Blätter und der Stiele, struktureller Aufbau des Elementes und Flexibilität des Stammes miteinander verglichen. Dabei wurden zwei handelsübliche künstliche Vegetationselemente, ein künstlicher Weidenzweig und ein künstlicher Pappelzweig ausgewählt und ihren natürlichen Pendants gegenübergestellt. Zu Vergleichszwecken wurde die in JÄRVELÄ (2006) genutzte künstliche Segge in die Versuche einbezogen. Die Parameter der ausgewählten Vegetationselemente sind in Tab. 4.1 dargestellt. Weiterhin sind im Anhang in Abb. A 7 und Abb. A 8 Fotografien der Elemente dargestellt.

Tab. 4.1 Parameter der Vegetationselemente zur Auswahl eines künstlichen Elementes

		Künstliche Elemente			Natürliche Elemente		
		Pappel	Weide	Segge	Pappel 1	Pappel 2	Weide
Pflanzenhöhe	[cm]	23	20	20	24	24	37 (liegend)
Anzahl der Blätter	[-]	12	35	14	40	45	37
Einseitige Blattfläche	[cm ²]	360,52	447	269	455,3	520,2	321,5
Mittlere Blattfläche	[cm ²]	30,04	12,80	19,21	11,38	11,56	8,69

Der künstliche Pappelzweig besteht aus einem Stamm, einer Blüte, vier Ästen und zwölf Blättern aus flexiblem bedrucktem Stoff. Der Stamm besteht aus einem 3 mm dicken, mit Kunststoff überzogenen Draht. Jeweils drei Blätter sind an einem Ast befestigt, die in gleichmäßigen Abständen über die Pflanzenhöhe verteilt sind. Als natürliche Pendants wurden zwei junge Triebe einer natürlichen Schwarzpappel ausgewählt (vgl. Abb. A 7 im Anhang). Die Triebe befanden sich in der ersten Wachstumsperiode und entsprangen am Fuß einer alten Schwarzpappel. Somit war die Flexibilität der hölzernen Teile, aufgrund des geringen Alters der Triebe, hoch und die mittlere Blattfläche im Vergleich zu Zweigen mehrjähriger Pflanzenteile gering. Während die Höhe der natürlichen Zweige an das künstliche Element angepasst werden konnte, und die Form der Blätter relativ gut übereinstimmte, wies die Blattgröße relativ große Unterschiede zwischen dem ausgewählten künstlichen und den natürlichen Pappelzweigen auf. Bei den zwei Exemplaren der natürlichen Pappeläste betrug die mittlere Blattgröße $11,38 \text{ cm}^2$ (Zweig 1) und $11,56 \text{ cm}^2$ (Zweig 2) bei 40 und 45 gemessenen Blättern. Der künstliche Pappelzweig wies hingegen eine mittlere Blattfläche von $30,04 \text{ cm}^2$ bei 12 Blättern auf. Daraus ergibt sich im Mittel für die künstliche Pappel eine um den Faktor 2,6 höhere Blattfläche pro Blatt als bei den natürlichen Pappelzweigen und eine um den Faktor 3,5 höhere Blattanzahl bei den natürlichen Pappelzweigen als bei der künstlichen.

Der Aufbau des künstlichen Weidenzweiges ähnelt dem eines Fächers (vgl. Abb. A 8 im Anhang). Er besteht aus 35 Blättern identischer Größe von jeweils $12,8 \text{ cm}^2$ aus flexiblem bedruckten Stoff. Der Stamm des Zweiges besteht nur im unteren Teil aus einem kunststoffüberzogenen Draht. Der natürliche Weidenzweig stellt das äußerste Ende eines mehrjährigen Astes dar und hat mit 37 Blättern eine vergleichbare Blattanzahl wie das künstliche Element. Er weist jedoch aufgrund einer stark variierenden Blattgröße eine deutlich geringere Gesamtblattfläche von $321,5 \text{ cm}^2$ im Gegensatz zu 447 cm^2 des künstlichen Elementes auf. Die künstliche Segge, mit der JÄRVELÄ (2006) zu dem Ergebnis kam, dass diese nicht das gleiche Widerstandsverhalten wie natürliche flexible Vegetation aufweist, besteht aus 14 identischen Blättern die am Fuß gebündelt befestigt sind (vgl. Abb. A 8 im Anhang). Dieses Vegetationselement weist keinen Stamm auf und hat eine Gesamtblattfläche von 269 cm^2 .

Widerstandsverhalten

Die Überprüfung der Eignung der flexiblen Vegetationselemente erfolgte durch den Vergleich des Widerstandsverhaltens unter Strömungsbelastung. Dabei wurde die Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft, der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Blattfläche untersucht und der Verlauf des Hebelarmes der resultierenden Strömungskräfte analysiert. Der Hebelarm beschreibt den Abstand des Angriffspunktes, der auf die Vegetationselemente wirkenden resultierenden Widerstandskraft von der Sohlenoberfläche. Als Blattfläche wird die einseitige Blattfläche herangezogen, wie von NIKLAS (1999) und VOGEL (2009) empfohlen wurde (vgl. Tab. 4.1). Die Kraftmessungen mit der natürlichen Pappel 1 wurden in der neigbaren Versuchsrinne bei Normalabflussverhältnissen mit einer konstanten Wassertiefe von 25 cm durchgeführt. Unter diesen Versuchsrandbedingungen waren die Vegetationselemente gerade überströmt. Unterschiedliche mittlere

Strömungsgeschwindigkeiten wurden durch Variation des Durchflusses und Anpassung der Rinnenneigung und der Wehrklappe eingestellt.

Abb. 4.1 zeigt die mittels der DFS gemessenen und über die einseitige Blattfläche normierten Strömungskräfte als Funktion der mittleren Fließgeschwindigkeit.

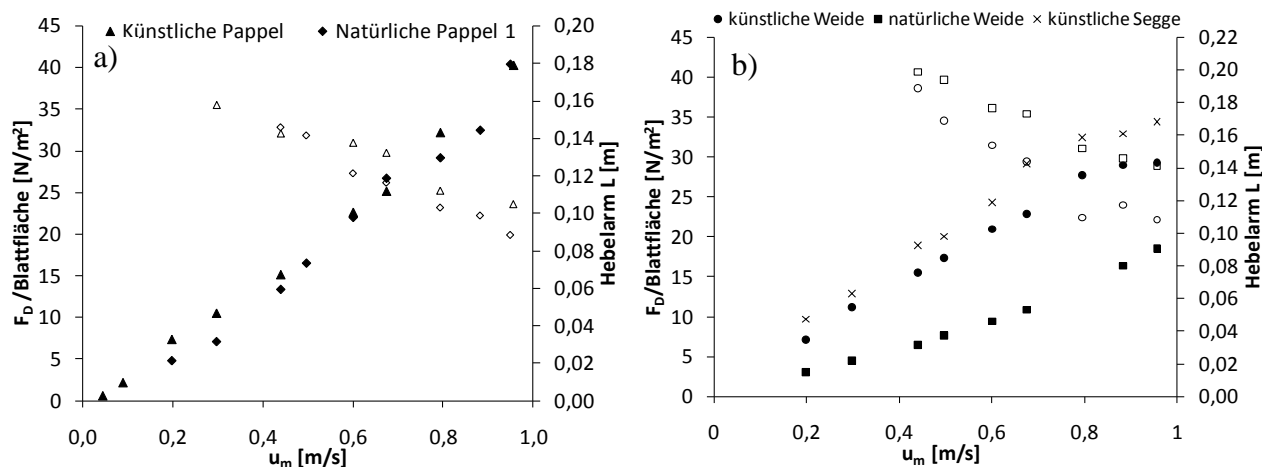


Abb. 4.1 (a) Vergleich des Widerstandsverhaltens des künstlichen und natürlichen Pappelzweiges 1 und (b) eines künstlichen und natürlichen Weidenzweiges im Vergleich mit einer künstlichen Seggenart. Volle Symbole markieren Kräfte, offene Symbole Hebelarme, durchgeführt in der Versuchsrinne.

Trotz der Unterschiede in der Blattfläche zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung der normierten Widerstandskräfte des künstlichen mit dem natürlichen Pappelzweig 1 (Abb. 4.1a). Beide Zweige weisen eine näherungsweise lineare funktionale Abhängigkeit der Widerstandskraft von der mittleren Fließgeschwindigkeit auf. Der negative Schnittpunkt einer linearen Verlängerung der Widerstandskräfte mit der Abszisse im Bereich sehr geringer Fließgeschwindigkeiten weist auf eine quadratische Abhängigkeit hin. Eine quadratische Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit wurde bereits von SPECK (2003) und XAVIER ET AL. (2010) bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten erhalten. Weiterhin zeigt der Hebelarm, der als Indikator für das Verformungsverhalten der Zweige gewertet werden kann, eine gute Übereinstimmung zwischen künstlichem und natürlichem Pappelzweig 1.

Im Gegensatz dazu zeigen die Widerstandskräfte der Weidenzweige keine gute Übereinstimmung, obwohl die Widerstandskräfte ebenfalls linear mit der Strömungskraft ansteigen. Gleiches gilt auch für die künstliche Segge (Abb. 4.1b). Die Widerstandskräfte des künstlichen Weidenzweiges sind näherungsweise doppelt so hoch wie die des natürlichen Zweiges. Dies ist auf die fächerförmige Anordnung der Blätter und Zweige zurückzuführen, die eine sehr hohe frontal angeströmte Fläche bewirkt. Außerdem ist bei dem künstlichen Weidenzweig sowie bei der Segge keine Tendenz zu einer quadratischen Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Bereich kleiner Geschwindigkeiten zu erkennen. Die Verlängerung der Widerstandskräfte in Richtung der Abszisse weist stattdessen auf eine lineare Abhängigkeit hin. Die Messungen zeigen weiterhin, dass der Hebelarm des künstlichen Weidenzweiges in Abhängigkeit von u_m deutlich schneller sinkt als der des natürlichen Zweiges. Dies ist ebenfalls auf den strukturellen Aufbau des künstlichen Vegeta-

tionselementes zurückzuführen. Die hohe Flexibilität der nicht mit Draht verstärkten Stiele der künstlichen Weide im oberen Teil des Zweiges führen zu einer höheren Deformation als dies bei dem natürlichen Zweig der Fall ist.

Um die Aussagekraft der Vergleichsmessung für die Eignung des künstlichen Pappelastes zu untermauern, wurde in dem Strömungskanal eine weitere Kraftmessung mit dem natürlichen Pappelzweig 2 durchgeführt (vgl. Tab. 4.1 und Abb. A 7). Die Ergebnisse in Abb. 4.2a zeigen wiederum (insbesondere beim Hebelarm) eine gute Übereinstimmung zwischen natürlichem und künstlichem Element, jedoch sind die Abweichungen der normierten Widerstandskraft höher als in Abb. 4.1a. Die niedrigere Widerstandskraft je Blattflächeneinheit von Pappelzweig 2 lässt sich auf einen unterschiedlichen Aufbau der natürlichen Elemente zurückführen. Während Pappelzweig 2 aus einem einzelnen vertikalen Stamm besteht und alle Blätter an diesen angeschlossen sind, besteht Pappelzweig 1 aus drei Ästen, wobei sich die Gabelung am untersten Ende befindet. Hier sind die Blätter gleichmäßig auf die drei Äste verteilt. Dieser Unterschied wirkt sich auf die Blattdichte des Elementes und damit auf die Abschattung der Blätter unter dem Einfluss von Strömungskräften aus. Eine höhere Blattdichte bewirkt, dass sich einzelne Blätter im Schatten weiterer Blätter befinden und einen geringeren Widerstand bewirken (vgl. VOGEL 2009). Dadurch ist die über die Blattfläche normierte Strömungskraft F_D des natürlichen Pappelzweiges 2 geringer als die der künstlichen Pappel, obwohl die absolute Widerstandskraft (Abb. 4.2b) größer ist.

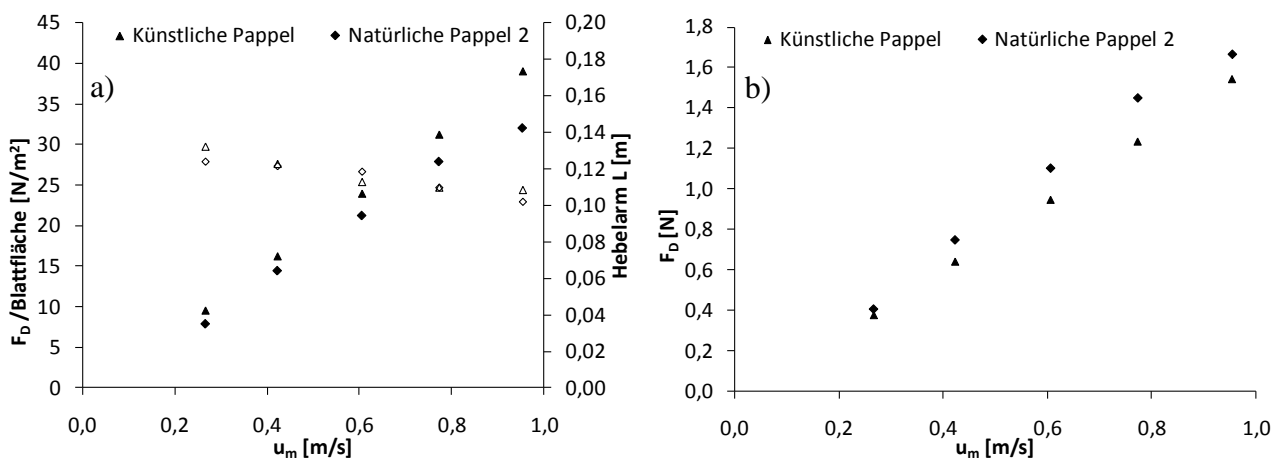


Abb. 4.2 Widerstandsverhalten des künstlichen und des natürlichen Pappelzweiges 2. (a) Vergleich der über die Blattfläche normierten Widerstandskraft und (b) der Widerstandskraft in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Geschlossene Symbole markieren Kräfte, offene Symbole Hebelarme, durchgeführt im Strömungskanal.

Aufgrund fehlender Hinweise und Vergleichsmessungen in der Literatur kann hier noch keine abschließende Aussage über die Güte der Vergleichbarkeit zwischen künstlichen und natürlichen Elementen getroffen werden. Auf Grundlage des hier durchgeführten Vergleiches des Hebelarmes, der Widerstandskräfte, der Größe und des Verlaufs der über die Blattfläche normierten Widerstandskraft kann jedoch gefolgert werden, dass der künstliche Pappelzweig besser mit seinen natürlichen Pendants vergleichbar ist als der Weidenzweig.

JÄRVELÄ (2006) stellte für die künstliche Segge in einem Bewuchsfeld ein von natürlichen Pflanzen abweichendes Widerstandsverhalten fest (Abhängigkeit zwischen Darcy-Weißbach Widerstandsbeiwert und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit). In den hier durchgeführten Versuchsreihen am Einzelement zeigte die künstliche Segge jedoch ebenso wie natürliche Pflanzen eine lineare Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Strömungsgeschwindigkeit. Daraus kann gefolgert werden, dass der alleinige Vergleich der Widerstandskraft-Geschwindigkeitsabhängigkeit eines flexiblen Einzelementes kein geeignetes Instrument darstellt, um auf das Widerstandsverhalten in einem Bewuchsfeld zu schließen.

4.2 Einfluss des Laubes auf den Vegetationswiderstand

In zahlreichen Veröffentlichungen wurde bereits der Einfluss des Laubes auf den Vegetationswiderstand hervorgehoben (vgl. Abschnitt 2.1.2). Dabei wurde zum einen die Abhängigkeit der Widerstandskräfte von der Form und der Flexibilität einzelner Blätter untersucht (VOGEL 1984, 1989, ALBAYRAK ET AL. 2010) und herausgefunden, dass mit steigender Flexibilität eine geringere Widerstandskraft bei gleicher Form erzeugt wird und Blätter einfacher Geometrie einen geringeren Widerstand aufweisen als Blätter mit einer komplexen Geometrie. Dies weist auf ein artspezifisches Widerstandsverhalten des Laubes hin. Weiterhin wirken, bezogen auf die Blattfläche, auf einzelne Blätter höhere Widerstandskräfte als auf Cluster (VOGEL 2009), wobei die Abhängigkeit von der Blattanzahl nicht untersucht wurde. Bei kleinen Vegetationselementen, wie dem künstlichen Pappelzweig oder seinem natürlichen Pendant, ist der Anteil des durch den Stamm hervorgerufenen Strömungswiderstandes klein aufgrund des geringen Stammdurchmessers ($d = 3 \text{ mm}$ beim künstlichen Pappelzweig). Der Hauptanteil des Widerstandes resultiert aus dem Widerstand der Blätter und ihrer Stängel. In Abschnitt 4.1 wurde bereits eine gute Übereinstimmung zwischen dem künstlichen und den natürlichen Pappelzweigen in Bezug auf die über die einseitige Blattfläche normierte Widerstandskraft festgestellt. Um das Widerstandsverhalten des künstlichen Pappelastes in Abhängigkeit der Blattfläche näher zu analysieren, wurden Versuche durchgeführt in denen die Widerstandskraft in Abhängigkeit der Anzahl der Blätter und deren einseitiger Blattfläche untersucht wurde (Abschnitt 4.2.1). Dieses spezifische Verhalten wird anschließend mit Ergebnissen aus Versuchen mit drei natürlichen Pappelästen verglichen (Abschnitt 4.2.2).

In Abschnitt 4.2.3 wird das Ergebnis von WILSON ET AL. (2008) eines tendenziell von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängigen Kräfteverhältnisses zwischen be- und entlaubten Pflanzen überprüft. Die Aussage von WILSON ET AL. (2008) basiert auf Untersuchungen von Zweigen. Die Ergebnisse sind jedoch, wie in Abschnitt 2.1.2 deutlich wurde, nicht notwendigerweise auf Bäume übertragbar. Für die Überprüfung werden die Ergebnisse der Versuchsreihen im Schleppkanal des CEHIPAR mit be- und entlaubten Bäumen (Weiden und Erlen) herangezogen.

4.2.1 Blattflächeneinfluss bei einem künstlichen Pappelzweig

Zur Untersuchung des Einflusses der Blattanzahl und der Blattfläche auf das Widerstandsverhalten in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit wurden zunächst zwei Versuchsreihen in der Versuchsrinne mit der künstlichen Pappel und einem Kraftmessgerät in der Mitte des Messbereichs durchgeführt. Die Versuche wurden bei strömenden Normalabflussbedingungen und einer konstanter Fließtiefe von $h = 25$ cm sowie zwei mittleren Fließgeschwindigkeiten $u_m = 0,20$ m/s ($S = 0,007$ %) und $u_m = 0,49$ m/s ($S = 0,042$ %) durchgeführt. Die Widerstandskräfte auf den künstlichen, 23 cm hohen Pappelzweig wurden schrittweise gemessen. Eine Darstellung des künstlichen Pappelzweiges bei den verschiedenen Belaubungsstufen ist in Abb. 4.3 dargestellt.



Abb. 4.3 Künstlicher Pappelzweig bei verschiedenen Belaubungsstufen. Von links nach rechts: Stamm mit Blüte, Stamm mit Ästen an die jeweils ein Blatt befestigt sind, Stamm mit Ästen und jeweils zwei Blättern, Stamm mit Ästen und jeweils 3 Blättern (vollständig belaubt).

Im ersten Schritt wurde die Kraft auf den Stamm ohne Blätter und Blüte gemessen. Im zweiten Schritt wurde die Blüte dem Stamm an der Stammspitze hinzugefügt. In allen weiteren Schritten wurden unterschiedliche Belaubungszustände simuliert indem nacheinander Äste mit einem, zwei oder drei Blättern an die vorgesehenen Anschlusspunkte von oben nach unten hinzugefügt wurden. Das bedeutet, zuerst wurde ein Ast mit einem Blatt am obersten Anschlusspunkt nahe der Blüte befestigt. Danach wurden alle weiteren drei Äste mit einem Blatt von oben nach unten an die verbleibenden Anschlusspunkte angeschlossen. Im nächsten Schritt wurden die Äste mit einem Blatt gegen Äste mit zwei Blättern nacheinander von oben nach unten ausgetauscht. Dies wurde ein weiteres Mal wiederholt bis an allen Anschlusspunkten Äste mit drei Blättern angeschlossen waren und die künstliche Pappel vollständig belaubt war. Wenn also der dritte Ast mit drei Blättern hinzugefügt worden ist, besteht die Pappel aus dem Stamm mit Blüte, den drei obersten Ästen mit jeweils drei Blättern und dem untersten Ast mit nur zwei Blättern. Die Blätter waren derart verteilt, dass die kleineren Blätter an den oberen Anschlusspunkten befestigt waren und die größeren unten.

Die Anordnung und Zugehörigkeit der Blätter zu den Ästen wurde gegenüber der Originalpflanze nicht verändert. Aus dieser Konstellation ergeben sich insgesamt 28 Kraftmessungen. Bei jeder dieser Messungen wurde die angeströmte Fläche mit der Unterwasserkamera aufgezeichnet und anschließend mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogrammes die frontal angeströmte Fläche bestimmt (vgl. Abschnitt 3.3 und SCHONEBOOM ET AL. 2008). Die Widerstandsbeiwerte C_D wurden mit Gl. (2.2) und $A = A_P$ sowie $u_R = u_m$ berechnet.

In Abb. 4.4 sind die Ergebnisse mit dem künstlichen Pappelzweig in der Versuchsrinne dargestellt. Die Abbildung zeigt die gemessene frontal projizierte Fläche A_P , die Widerstandskraft F_D , den C_DA_P -Parameter und den Widerstandsbeiwert C_D als Funktion der einseitigen kumulativen Blattfläche A_Σ für beide untersuchten Fließgeschwindigkeiten $u_m = 0,20$ und $0,49$ m/s. Die Kräfte auf den Stamm und den Stamm mit Blüte sind nur für die höhere Fließgeschwindigkeit dargestellt, da sie für die geringe Fließgeschwindigkeit unterhalb der Messgenauigkeit des Kraftmessgerätes gelegen haben. Die in Abb. 4.4a dargestellte frontal projizierte Fläche zeigt, dass A_P bei beiden Fließgeschwindigkeiten bis zu $A_\Sigma = 116 \text{ cm}^2$ fast identisch ist, also bis zu der Blattstufe an der an jeden der vier Anschlusspunkte nur ein Blatt angeschlossen ist. Dies kann mit dem Anschluss der Blätter an die Anschlusspunkte erklärt werden, der eine Rotation der Blätter um den Anschlusspunkt und damit eine stromlinienförmige Ausrichtung der Blätter begünstigt. Obwohl die Kraft bei $u_m = 0,20$ m/s in diesem Bereich relativ gering ist, reicht sie aus um die einzelnen Blätter um den Anschlusspunkt rotieren zu lassen. Daher ist A_P bis zu diesem Punkt unabhängig von u_m . Die Unabhängigkeit von u_m kann auch für die Widerstandsbeiwerte C_D festgestellt werden, die sich für $A_\Sigma \leq 116 \text{ cm}^2$ sehr ähnlich sind. Gleiches gilt für den C_DA_P -Parameter in Abb. 4.4d. Dies wirkt sich auf die in Abb. 4.4b dargestellten Quotienten der Widerstandskräfte bei gleicher Blattfläche aus, die sich für $A_\Sigma \leq 116 \text{ cm}^2$ ungefähr im gleichen Bereich wie der quadrierte Geschwindigkeitsquotient $(0,49/0,20)^2 \approx 6$ befinden. Im Bereich für $A_\Sigma \leq 116 \text{ cm}^2$ kann also näherungsweise eine quadratische Abhängigkeit der Widerstandskräfte von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit festgestellt werden, was auf den speziellen Anschluss der Blätter an den Stamm zurückzuführen ist.

Größere Unterschiede in der frontal projizierten Fläche A_P treten für $A_\Sigma > 116 \text{ cm}^2$ auf. Das ist der Fall, wenn Äste mit zwei Blättern sukzessiv an die Pflanze angeschlossen werden. Abb. 4.4a zeigt, dass für $u_m = 0,20$ m/s A_P deutlich stärker zunimmt als für $u_m = 0,49$ m/s. Dies kann mit der einsetzenden Interaktion der Blätter erklärt werden, die zu einer Biegung der Blätter durch die Strömungskräfte führt, da Äste mit zwei oder mehr Blättern an der Rotation um den Anschlusspunkt durch die gegenseitige Beeinflussung der Blätter gehindert werden. In der Konsequenz sind bis zu $A_\Sigma = 225 \text{ cm}^2$ die Rotation und die Blattverformung die dominierenden Einflussfaktoren. Der Unterschied der A_P -Werte ergibt sich aus der Flexibilität unter dem Einfluss der Strömungskräfte. Da bei der geringen Strömungsgeschwindigkeit die Kräfte nicht groß genug sind, um die Blätter vollständig stromlinienförmig zu verformen, sind die A_P -Wert für die geringe Fließgeschwindigkeit höher als für die hohe Fließgeschwindigkeit, wo sich die Verformung der Blätter stärker bemerkbar macht. Die Streuung der A_P -Werte für $u_m = 0,2$ m/s ist auf die Methodik der Experimente zurückzuführen, da es teilweise schwierig gewesen ist, die vorige Position der Blätter wiederherzustellen

wenn neue hinzugefügt worden sind. Da die Strömungskräfte bei $u_m = 0,49$ m/s ausreichen, die Blätter stark zu verformen, ist dort eine geringe Streuung zu beobachten. Die Unterschiede in der strömungsgünstigen Verformung der Blätter wirkt sich auch auf den C_D -Wert aus, der ab $A_\Sigma > 116$ cm² einen signifikant höheren Wert bei $u_m = 0,20$ m/s annimmt als bei 0,49 m/s.

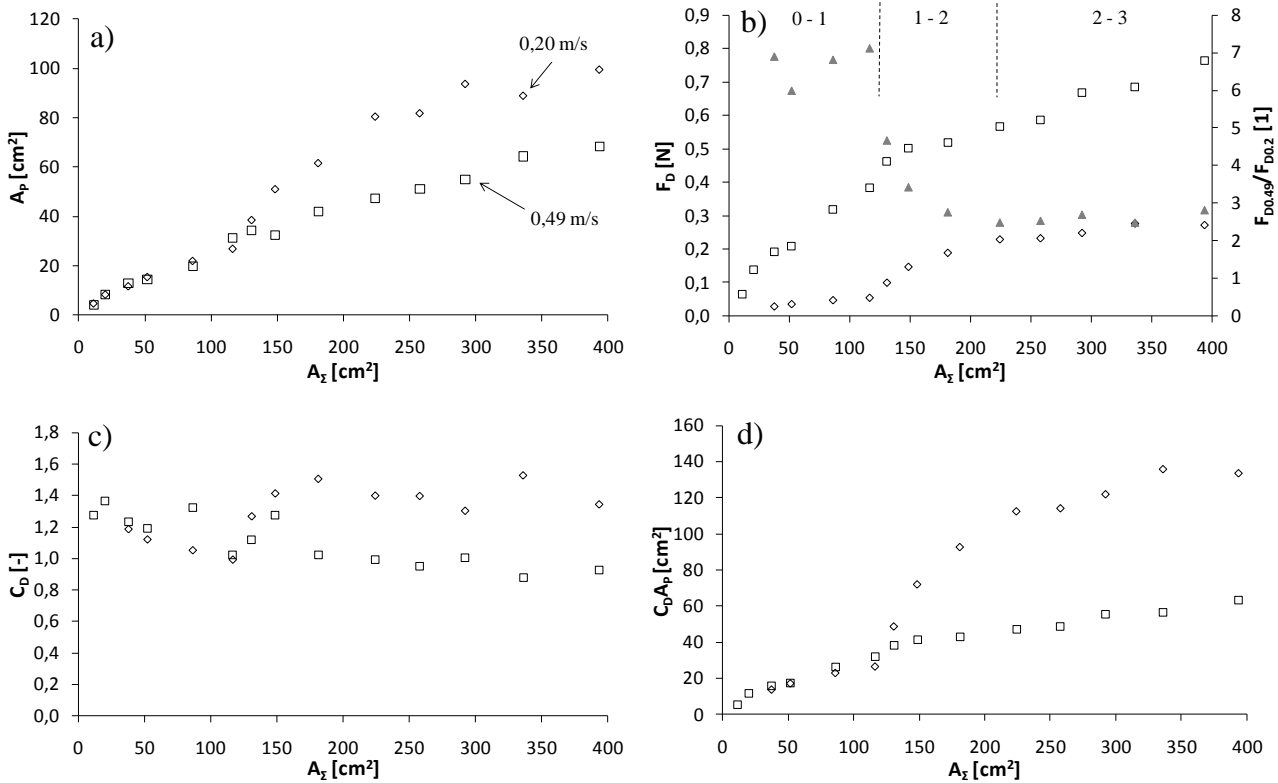


Abb. 4.4 a) Frontal projizierte Fläche A_p , b) Widerstandskraft F_D , c) Widerstandsbeiwert C_D , und d) $C_D A_p$ als Funktion der einseitigen kumulativen Blattfläche A_Σ für $u_m = 0,20$ m/s (Rauten) und $0,49$ m/s (Quadrate) und das Verhältnis der Widerstandskräfte (Dreiecke).

Die beobachteten Effekte der behinderten Rotation um die Anschlusspunkte und die Blattverformung werden in Abb. 4.4a, b und d durch die Veränderung der Gradienten der Kurven sichtbar. Dies ist der Fall, wenn an alle Anschlusspunkte jeweils ein Blatt ($A_\Sigma = 116$ cm²) und jeweils zwei Blätter ($A_\Sigma = 225$ cm²) angeschlossen sind. Die Höhe der Veränderung hängt dabei von der Fließgeschwindigkeit ab. Weiterhin zeigt der Quotient aus den Kraftmessungen in Abhängigkeit von u_m eine signifikante Verringerung, wenn Äste mit zwei Blättern an den Stamm angeschlossen werden (Abb. 4.4b).

Wenn an alle Anschlusspunkte Äste mit mindestens zwei Blättern angeschlossen sind ($A_\Sigma \geq 225$ cm²), kann der Einfluss der Rotation um den Anschlusspunkt vernachlässigt werden und die Widerstandskraft ist nur noch von der gegenseitigen Interaktion der Blätter und deren stromlinienförmigen Verformung abhängig. Abb. 4.4b zeigt dass die Widerstandskraft für beide Fließgeschwindigkeiten tendenziell linear mit steigender Blattfläche zunimmt. Weiterhin ist der Quotient aus den Widerstandskräften konstant und korrespondiert mit dem linearen Verhältnis der Fließgeschwindigkeiten ($0,49/0,2 = 2,45$). Außerdem ist bemerkenswert, dass für $A_\Sigma \geq 225$ cm² der C_D -

Wert zu einem konstanten Wert für beide Fließgeschwindigkeiten tendiert, wobei ein höherer C_D -Wert für $u_m = 0,20$ m/s auf ein geringer ausgeprägtes Verformungsverhalten hinweist.

Die hier diskutierte Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Blattfläche wird von dem flexiblen Verhalten des Stammes der künstlichen Pappel überlagert. Der Einfluss der Stammbiegung wurde anhand von Fotografien der Seitenansicht des Elementes durchgeführt. Die Analyse der Fotos zeigte, dass der Neigungswinkel mit steigender Blattfläche zunahm und für $u_m = 0,49$ m/s höher war als für 0,20 m/s. Die Ergebnisse konnten jedoch nicht quantitativ mit der Widerstandskraft in Verbindung gebracht werden. Ein größerer Neigungswinkel bei höherer Geschwindigkeit wurde bereits von OPLATKA (1998) festgestellt.

Die Untersuchungen zeigen, dass für den Teilbereich mit einer Blattfläche $A_L \geq 225$ cm², d.h. bei dem das stromlinienförmige Verhalten der Blätter das Widerstandsverhalten beeinflusst, die Widerstandskraft näherungsweise linear von der Blattfläche abhängig ist und eine lineare Abhängigkeit der Kräfte zwischen unterschiedlichen Geschwindigkeiten gleicher Blattfläche besteht. Dies weist darauf hin, dass die Möglichkeit besteht, eine pflanzenspezifische Widerstandsfunktion für den Bereich ab einer Blattfläche von $A_L \geq 225$ cm² zu entwickeln, mit der die Widerstandskraft in Abhängigkeit der Blattfläche und der Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden kann.

Da bei der geringen Fließgeschwindigkeit die Blattdeformation noch nicht voll ausgebildet ist, wurden weitere Untersuchungen im Strömungskanal mit den drei Strömungsgeschwindigkeiten $u_m = 0,61$ m/s, 0,77 m/s und 1,12 m/s durchgeführt. Abweichend zu den Versuchen in der Versuchsrinne wurde in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen, sodass zunächst die Kräfte der voll belaubten Pflanze gemessen und sukzessive die Blätter entfernt wurden. Außerdem blieb aufgrund des begrenzten Rohdurchmessers die Blüte unberücksichtigt und die angeströmte Fläche wurde nicht aufgenommen. Ansonsten wurden zum besseren Vergleich der Messungen im Strömungskanal mit denen in der Versuchsrinne der künstlichen Pappel die gleichen Blätter in der gleichen Reihenfolge getestet.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Messungen im Strömungskanal und denen in der Versuchsrinne herzustellen, sind in Abb. 4.5 jeweils eine Datenreihe aus der Versuchsrinne und eine Datenreihe im Strömungskanal bei vollständiger Belaubung dargestellt. Die Widerstandskräfte sind in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Die Abbildung zeigt eine hohe Übereinstimmung der im Strömungskanal gemessenen Widerstandskräfte der künstlichen Pappel (Rauten) mit denen der Versuchsrinne (offene Dreiecke), die bei höchster Belaubungsstufe durchgeführt worden sind. Dies weist auf eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse hin.

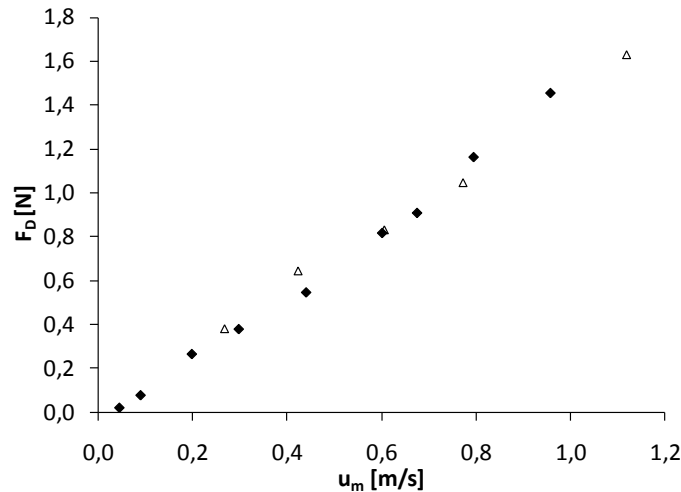


Abb. 4.5 Vergleich der Widerstandskräfte der künstlichen Pappel bei höchster Belaubungsstufe in der Versuchsrinne (Rauten) und dem Strömungskanal (offene Dreiecke). Dargestellt sind die Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

In Abb. 4.6a sind die Ergebnisse der Kraftmessungen des künstlichen Pappelzweiges im Strömungskanal zusammen mit den Ergebnissen aus der Versuchsrinne ($u_m = 0,2$ m/s und $0,49$ m/s) in Abhängigkeit der einseitig kumulativen Blattfläche A_Σ dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass sich für alle Strömungsgeschwindigkeiten der Gradient der Kurven bei $A_\Sigma = 225$ cm² signifikant ändert. Die Widerstandskraft steigt für $A_\Sigma \geq 225$ cm² bei allen untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten näherungsweise linear mit der Blattfläche an. Für $A_\Sigma = 258$ cm² fehlen die Datenpunkte der Versuchsreihen aus dem Strömungskanal. Hier hat sich die Anordnung der Blätter signifikant von den anderen Messungen unterschieden, da sich ein einzelnes Blatt vor den Stamm gelegt hat. Daraus resultieren aufgrund einer höheren angeströmten Fläche, höhere Widerstandskräfte als für vergleichbare Messungen mit einer unbehinderten Verformung der Blätter.

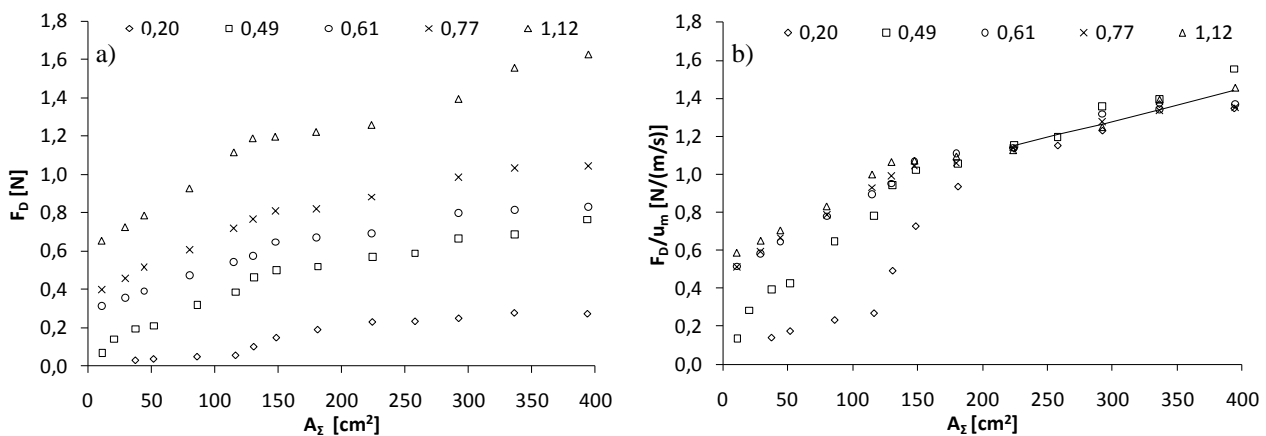


Abb. 4.6 Versuchsergebnisse des künstlichen Pappelzweiges in der Versuchsrinne ($u_m = 0,20$ m/s und $0,49$ m/s) und dem Strömungskanal ($u_m = 0,61$ m/s, $0,77$ m/s und $1,12$ m/s). (a) Widerstandskraft und (b) über die Fließgeschwindigkeit normierte Widerstandskraft in Abhängigkeit der einseitigen kumulativen Blattfläche.

Abb. 4.6b zeigt das Verhältnis F_D/u_m in Abhängigkeit der kumulativen einseitigen Blattfläche A_Σ . Die hohe Übereinstimmung zwischen den Versuchsreihen weist auf eine lineare Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Fließgeschwindigkeit für gleiche Blattflächen ab $A_\Sigma \geq 225$ cm² hin.

Nennenswerte Abweichungen treten nur bei der höchsten Blattstufe auf. Systematische Abweichungen werden für $A_{\Sigma} < 225 \text{ cm}^2$ beobachtet. Die systematischen Abweichungen treten nur zwischen den Messergebnissen in der Versuchsrinne und dem Strömungskanal auf. Über die Ursache für diese Abweichungen kann aufgrund fehlender Informationen über die angeströmte Fläche bei den Messungen im Strömungskanal keine sichere Aussage gemacht werden. Die Unterschiede sind möglicherweise auf den höheren Verbauungsgrad in der Rohrströmung zurückzuführen.

Pflanzenspezifische Widerstandsbeziehung

Die lineare Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Blattfläche und der Strömungsgeschwindigkeit für $A_{\Sigma} \geq 225 \text{ cm}^2$ ermöglicht die Ableitung einer pflanzenspezifischen Widerstandsbeziehung mit der die Widerstandskraft für eine beliebige Strömungsgeschwindigkeit und Blattfläche innerhalb der Gültigkeitsgrenzen prognostiziert werden kann.

Über eine Regressionsanalyse wurde folgende empirische Widerstandsbeziehung bestimmt:

$$F_{KPappel} = u_m \cdot (A_{\Sigma} \cdot 17,06 + 0,767) \quad (3.1)$$

mit $0,20 \leq u_m \leq 1,12 \text{ m/s}$ und $0,0225 \text{ m}^2 \leq A_{\Sigma} \leq 0,0394 \text{ m}^2$.

In Abb. 4.6b ist die Widerstandsbeziehung als Gerade dargestellt. Die maximale absolute Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Kräften liegt zwischen $-0,059 \text{ N}$ und $+0,068 \text{ N}$. Prozentual vom gemessenen Wert liegt die Abweichung zwischen $-7,7$ und $+6,5 \%$.

4.2.2 Blattflächeneinfluss bei natürlichen Pappelzweigen

Für den künstlichen Pappelzweig konnte im vorangegangenen Abschnitt ein empirischer funktionaler Zusammenhang zwischen Widerstandskraft, Blattfläche und Strömungsgeschwindigkeit entwickelt werden. Eine Übertragbarkeit dieses spezifischen Widerstandsverhaltens auf natürliche Pappelzweige wird im Folgenden anhand von Versuchen überprüft.

Zu diesem Zweck sind Versuchsreihen mit drei natürlichen Pappelzweigen in Zusammenarbeit mit einer studentischen Arbeit (DÜSTERHÖFT, 2010) im Strömungskanal des LWI durchgeführt worden. Dabei wurden zunächst die Kräfte der voll belaubten Pflanzen gemessen. Sukzessive wurde die Anzahl der Blätter reduziert, bis der Stamm übrig geblieben ist. Aufgrund der höheren Blattanzahl von jeweils 24 Stück (vgl. Tab. 4.2) wurden abweichend zu den Versuchen mit dem künstlichen Pappelzweig zwei Blätter bei jeder Blattstufe entfernt. Bei jeder Blattstufe wurden die Kräfte bei vier verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten $u_m = 0,27 \text{ m/s}$, $0,42 \text{ m/s}$, $0,61 \text{ m/s}$ und $0,77 \text{ m/s}$ gemessen. In Tab. 4.2 sind die Pflanzenparameter der natürlichen Pappelzweige übersichtlich aufgelistet. Im Anhang in Abb. A 9 sind Fotografien der Pappelzweige dargestellt.

Tab. 4.2 Pflanzenparameter der natürlichen Pappelzweige 1-3

	Pappelzweig 1	Pappelzweig 2	Pappelzweig 3
Pflanzenhöhe	15,3 cm	15,5 cm	14,5 cm
Stammdurchmesser	0,32 - 0,51 cm	0,36 – 0,49 cm	0,43 – 0,54 cm
A_P des Stammes	12 cm ²	10 cm ²	22 cm ²
Anzahl der Abzweige	2 + Spitze	2 + Spitze	2 + Spitze
Anzahl der Blätter	24	24	24
Blattfläche gesamt	667 cm ²	778 cm ²	804 cm ²
mittlere Blattfläche	27,3 cm ²	32 cm ²	32,6 cm ²
kleinstes und größtes Blatt	5,35 cm ² – 41,26 cm ²	11,4 cm ² – 52,0 cm ²	9,0 cm ² – 54,4 cm ²

Die Ergebnisse der Kraftmessungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Belaubungsstufen sind in Abb. 4.7 dargestellt, wobei auf der linken Seite (a1-3) die Widerstandskräfte in Abhängigkeit von A_Σ und auf der rechten Seite (b1-3) die Quotienten der über die mittlere Fließgeschwindigkeiten normierten Widerstandskräfte dargestellt sind (Pappelzweige 1,2,3 von oben nach unten). Zu beachten ist, dass im Gegensatz zu den in Abschnitt 4.1 untersuchten natürlichen Pappelzweigen die mittlere Blattfläche größer und vergleichbar mit der mittleren Blattfläche des künstlichen Pappelzweiges ist. Aufgrund der höheren Blattanzahl ist die gesamte Blattfläche näherungsweise doppelt so hoch wie bei der künstlichen Pappel.

Trotz dieser Unterschiede im Pflanzenaufbau zeigen die Ergebnisse in Abb. 4.7a1-3, wie bei der künstlichen Pappel, eine vergleichbare Tendenz einer näherungsweise linear ansteigenden Widerstandskraft in Abhängigkeit der kumulativen Blattfläche A_Σ . Die Streubreite der Messungen ist jedoch bei allen Versuchsreihen höher als bei der künstlichen Pappel, was zum einen auf den höheren Grad der Interaktion zwischen den Blättern und zum anderen auf die höhere Flexibilität der Blätter zurückgeführt werden kann.

Mit den in Abb. 4.7b1-3 dargestellten Quotienten der über die Strömungsgeschwindigkeit normierten Widerstandskräfte kann die Abhängigkeit der Widerstandskräfte von der Strömungsgeschwindigkeit untersucht werden. Ein linearer Zusammenhang besteht, wenn der Quotient den Wert 1 annimmt. Die Abbildungen zeigen jedoch, dass geringe Abweichungen von einem linearen Zusammenhang für alle getesteten natürlichen Pappelzweige vorliegen. Eine weitergehende Analyse der Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Fließgeschwindigkeit zeigte, dass diese durch den funktionalen Zusammenhang $F \propto u^a$ beschrieben werden kann, wobei der Exponent a für Pappel 1 zu $a_1 = 1,2$, für Pappel 2 zu $a_2 = 1,1$ und Pappel 3 zu $a_3 = 1,2$ ermittelt wurde. Diese liegen im Bereich der von VOGEL (1984) ermittelten Exponenten (vgl. Abschnitt 2.1.2.1).

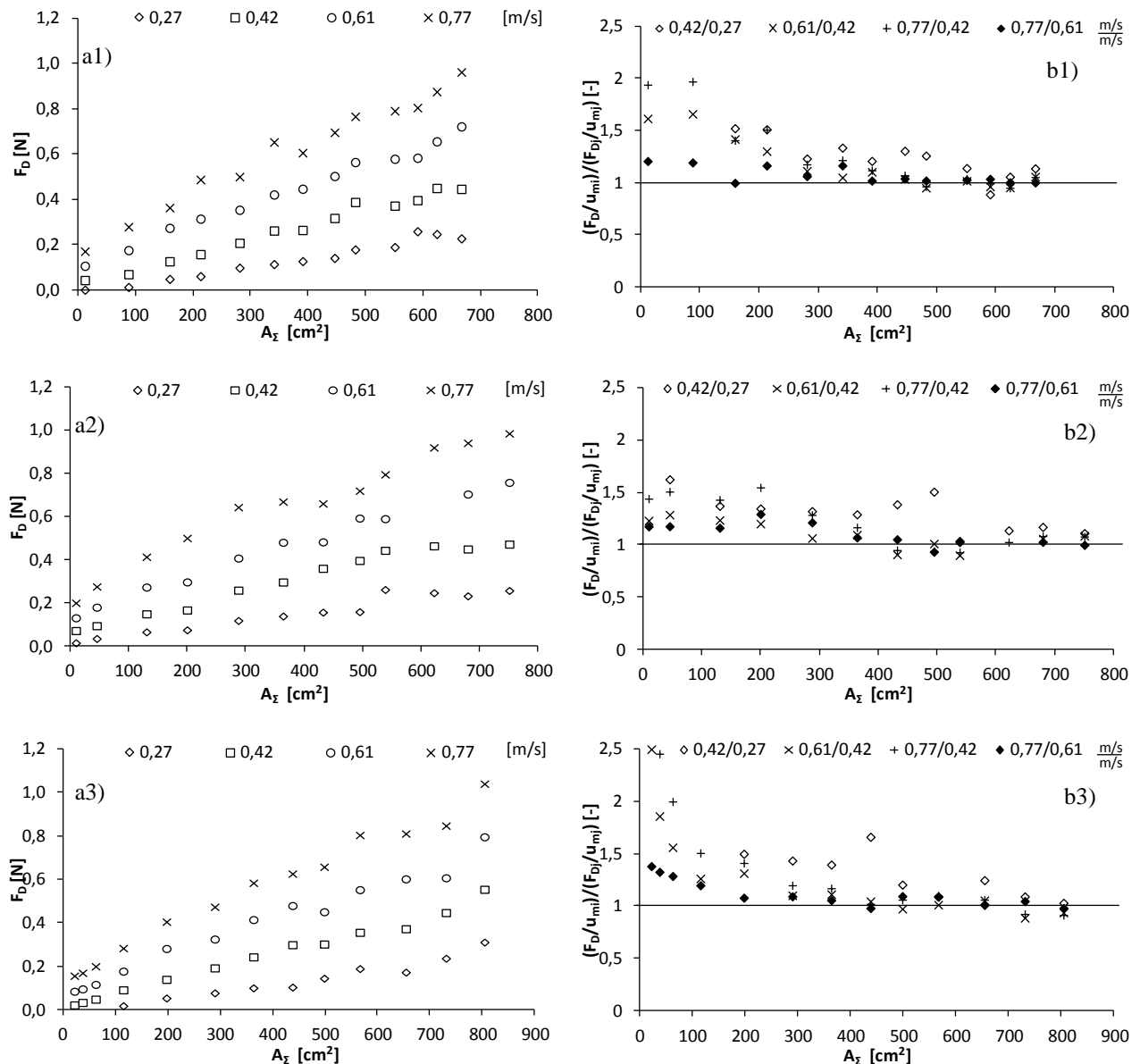


Abb. 4.7 Widerstandskräfte in Abhängigkeit der kumulativen einseitigen Blattfläche für Pappel 1 (a1), Pappel 2 (a2), Pappel 3 (a3) und die Quotienten aus den über die Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräften in Abhängigkeit der kumulativen einseitigen Blattfläche für Pappel 1 (b1), Pappel 2 (b2) und Pappel 3 (b3).

In Abb. 4.8a sind die Mittelwerte der über die Fließgeschwindigkeit normierten Kräfte in Abhängigkeit der Blattfläche von Pappel 1 bis 3 aufgetragen. Die Abbildung zeigt eine gute Übereinstimmung der drei Zweige, die sich in ihren Eigenschaften nur geringfügig unterscheiden. Abweichungen zwischen den Zweigen sind auf Unterschiede in der Flexibilität der Stämme zurückzuführen. Weiterhin sind in Abb. 4.8b die mittleren Widerstandskräfte normiert über die Blattfläche und die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der kumulativen Blattfläche dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Widerstandskräfte je Blattflächeneinheit mit steigender kumulativer Blattfläche sinken und damit abhängig von der Blattdichte sind. Die gleiche Tendenz kann auch bei der künstlichen Pappel beobachtet werden (nicht dargestellt). Mit jedem Blatt, welches von der Pflanze entfernt wird, verringern sich die Abschattungseffekte und die mittlere Widerstandskraft je Blattflächeneinheit

steigt. Während die Erhöhung der Kraft zunächst noch gering ist, wird der Anstieg größer, je weniger Blätter am Stamm verbleiben.

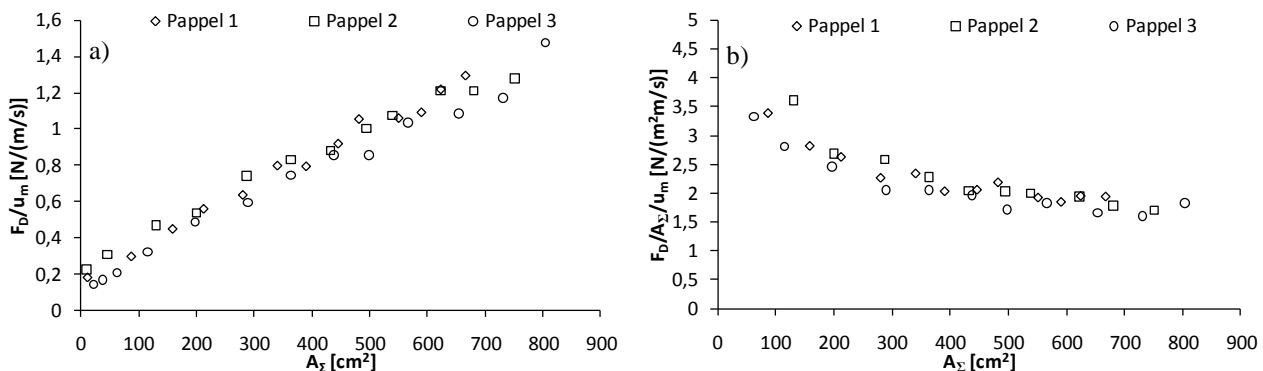


Abb. 4.8 (a) Mittelwerte der über die Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräfte und (b) der über die Blattfläche und der Fließgeschwindigkeit normierten Widerstandskräfte (b) von Pappel 1, 2 und 3 in Abhängigkeit der Blattfläche.

Die Versuchsreihe zeigt, dass eine Beschreibung des Einflusses der einzelnen Komponenten der Widerstandskräfte auf Grundlage dieser Versuche nicht möglich ist, weil die Veränderung einer Komponente, hier der Blattfläche, Einfluss auf viele weitere Komponenten hat, wie dem Druck- und Reibungswiderstand, der Porosität, der Objektform etc. Die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten der Widerstandskräfte sind komplex und können nicht abschließend erklärt werden. Dennoch kann die beobachtete lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und kumulativer Blattfläche der künstlichen Pappel auch bei den natürlichen Pappelzweigen beobachtet werden. Das Verhalten ist charakteristisch und lässt auf ein vergleichbares Widerstandsverhalten der künstlichen und der natürlichen Elemente schließen, da die Blätter den Vegetationswiderstand wesentlich beeinflussen.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen kann die Empfehlung gegeben werden die Vergleichbarkeit von künstlicher und natürlicher Vegetation auf Grundlage der Abhängigkeit des Widerstandsverhaltens von der kumulativen Blattfläche an einem Einzelelement zu bewerten. Dies gilt jedoch nur dann, wenn der Einfluss des Stammes gering ist und die Blätter den wesentlichen Anteil am Strömungswiderstand erzeugen.

4.2.3 Blattflächeneinfluss bei Bäumen und Sträuchern

Der Einfluss der Blätter auf den Strömungswiderstand bei großen Bäumen und Sträuchern ($H > 1$ m) ist im Vergleich zum Einfluss bei kleinen Ästen und Zweigen, wie sie im vorigen Abschnitt untersucht worden sind, kleiner. Der geringere Einfluss resultiert aus einem höheren prozentualen Anteil der Holzmasse an der Gesamtmasse und damit der Holzfläche bei großen Bäumen und Sträuchern. Versuche mit Pflanzen im be- und entlaubten Zustand von FREEMAN ET AL. (2000) zeigten, dass der Anteil der durch die Blätter induzierte Widerstandskraft höher sein kann als die Widerstandskraft die durch die Äste hervorgerufen wird. Der Vegetationswiderstand ist jedoch auch im entlaubten Fall beträchtlich. Weiterhin zeigten die Versuche, dass auch im entlaubten Fall eine

näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Fließgeschwindigkeit besteht und sich die Pflanzen flexibel verhalten. Dies wurde auch bei den in XAVIER (2010) beschriebenen Versuchsergebnissen für Strömungsgeschwindigkeiten $> 0,5$ m/s deutlich. Eine vereinfachende Annahme eines starren Widerstandsverhaltens im entlaubten Fall ist somit nicht zulässig. WILSON ET AL. (2008) bildeten den Quotienten der Widerstandskräfte im be- und entlaubten Zustand eines Efeuzweiges und beobachteten ein tendenziell von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängigen Quotienten. Diese Beobachtung wird im Folgenden anhand von Messungen an Weiden- und Erlenbäumen, die im Schleppkanal der Versuchsanstalt CEHIPAR bei Madrid durchgeführt worden sind, überprüft. Neben der Beschreibung der Versuchseinrichtung in Kap 3.5 sind Aufbau, Durchführung, Datenaufbereitung und Auswertung der Kraftmessungen ausführlich und umfassend in XAVIER (2010) beschrieben. Die Pflanzenparameter und Abmessungen der hier behandelten Vegetationselemente sind im Anhang in Tab.A 2 zusammengefasst.

Abb. 4.9 zeigt repräsentativ Ergebnisse verschiedener Weiden- (Abb. 4.9a) und Erlenbäumen (Abb. 4.9b) im be- und entlaubten Zustand. Für den be- und entlaubten Zustand besteht im Bereich geringer Fließgeschwindigkeiten ($< \sim 0,5$ m/s) eine näherungsweise quadratische Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und der Strömungsgeschwindigkeit u (Fahrgeschwindigkeit des Wagens). Der Übergang zwischen quadratischer und linearer Abhängigkeit ist variabel und ist neben der Flexibilität und der Struktur der Pflanze auch von der Widerstandskraft abhängig und variiert daher für die einzelnen Vegetationselemente. Aufgrund der Abhängigkeit von der Widerstandskraft müsste der Übergang zu einer näherungsweise linearen Abhängigkeit für entlaubte Vegetationselementen bei einer größeren Strömungsgeschwindigkeit stattfinden, als im belaubten Zustand. In den Auswertungen von XAVIER (2010) trifft diese Folgerung jedoch nicht immer zu, was auf das verwendete Kriterium bei der Bestimmung der Grenzggeschwindigkeit, welche den Übergang von der quadratischen zur linearen Abhängigkeit beschreibt, zurückgeführt werden kann. Als Kriterium wurde ein Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsgerade mit $R^2 \geq 0,99$ festgelegt, wobei so lange Datenpunkte beginnend mit der geringsten Strömungsgeschwindigkeit aus der Regressionsgeraden entfernt wurden, bis das Kriterium erfüllt wurde. Oberhalb dieses Grenzbereiches liegt eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit vor und entspricht den Ergebnissen von OPLATKA (1998), FISCHENICH (1996), FREEMAN ET AL. (2000), RUDNICKI ET AL. (2004), VOLLSINGER ET AL. (2005), ARMANINI ET AL. (2005), WILSON ET AL. (2008) u.v.m. Die Ergebnisse zeigen weiterhin eine konsistent größere Widerstandskraft im belaubten als im entlaubten Zustand.

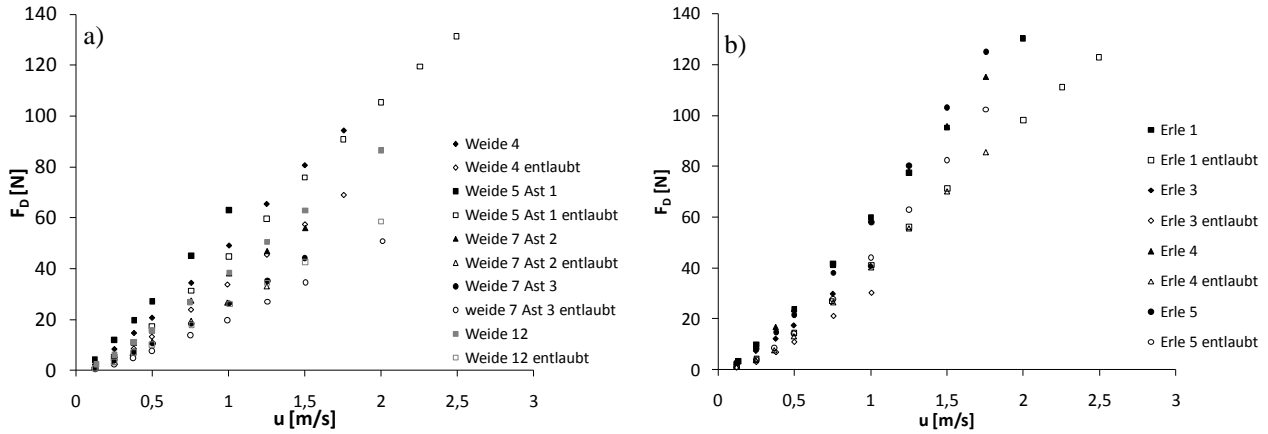


Abb. 4.9 Widerstandskräfte F_D in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeiten u_m für ausgewählte Weiden (a) und Erlen (b) im be- und entlaubten Zustand.

Der Einfluss des Laubes auf die Widerstandskraft ist signifikant, wobei zu beachten ist, dass die Versuche während der Monate März und April durchgeführt wurden und die Blätter noch nicht vollständig entwickelt gewesen sind. Es ist daher zu erwarten, dass sich der Anteil der Widerstandskräfte am Gesamtwiderstand mit dem Fortschreiten der Wachstumsphase der Blätter weiter erhöhen wird. Obwohl die Widerstandskräfte des Laubes in dieser Wachstumsphase der Blätter nur schlecht mit der Blattmasse korrelieren (vgl. XAVIER 2010), kann anhand der Versuchsreihen der Einfluss des Laubes auf die Widerstandskraft qualitativ untersucht werden. Dazu wurden die Widerstandskräfte des Laubes $F_{D,Laub}$ anhand der folgenden Beziehung für gleiche Strömungsgeschwindigkeiten berechnet:

$$F_{D,Laub} = F_{D,belaubt} - F_{D,entlaubt} \quad (3.2)$$

Das Verhältnis $F_{D,Ratio}$ zwischen der Widerstandskraft der Laubes und der hölzernen Teile bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich zu:

$$F_{D,Ratio} = \frac{F_{D,Laub}}{F_{D,entlaubt}} \quad (3.3)$$

Das Verhältnis der Widerstandskräfte $F_{D,Ratio}$ ist in Abb. 4.10 für die Weiden (Abb. 4.10a) und die Erlen (Abb. 4.10b) dargestellt. Insbesondere bei den Erlen ist die Widerstandskraft des Laubes bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit $u = 0,25$ m/s größer als die der Äste. Dabei wird ein Verhältnis $F_{D,Ratio}$ von 1,86 bis 2,9 erreicht. Bei den Weiden ist das Verhältnis weniger stark ausgeprägt und erreicht Werte zwischen 0,95 und 2,3. Unabhängig von der Pflanzenart sinkt das Verhältnis mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und tendiert bei den Weiden ab einer Geschwindigkeit $u = 0,75$ m/s gegen einen Grenzwert. Bei den Erlen ist die Annäherung an einen Grenzwert nicht so stark ausgeprägt. Das Verhältnis scheint mit steigender Geschwindigkeit weiter zu sinken, kann jedoch näherungsweise durch einen konstanten Wert approximiert werden.

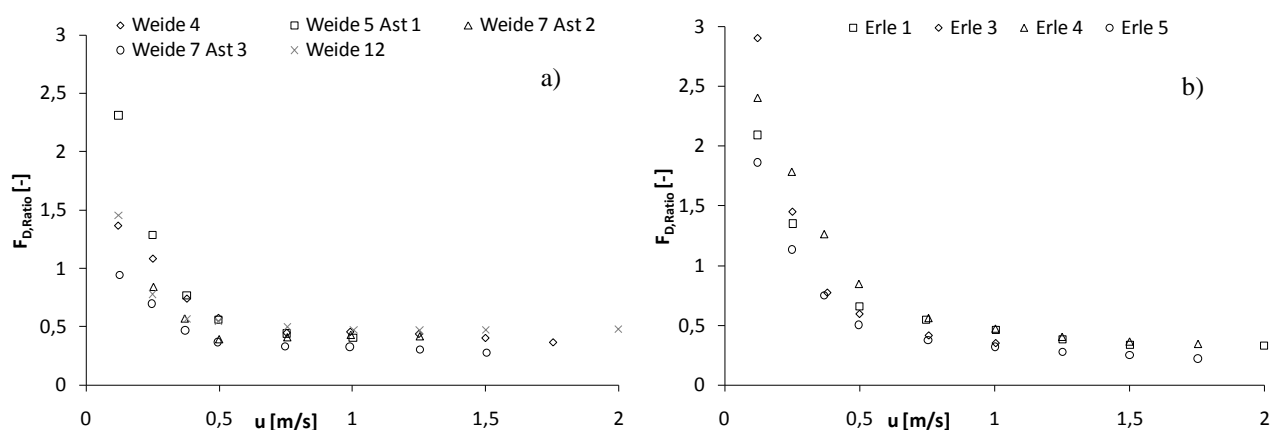


Abb. 4.10 Kräfteverhältnis $F_{D,Ratio}$ für (a) die Weiden und (b) die Erlen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit.

Die Abbildung verdeutlicht, dass im Bereich geringer Strömungsgeschwindigkeiten der Einfluss der Blätter auf die Widerstandskraft höher ist, als der Einfluss der Äste ($F_{D,Ratio} > 1$) obwohl die Blätter noch nicht vollständig entwickelt gewesen sind. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit sinkt der Einfluss der Blätter durch die Verformung der Blätter ($F_{D,Ratio} < 1$) und wird näherungsweise konstant, wenn die Verformung der Blätter ihr Maximum erreicht. Dies zeigt, dass die Verformung der Blätter ebenso von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist, wie die Verformung der Äste.

Die Versuche bestätigen die Beobachtung von WILSON ET AL. (2008) eines konstanten Verhältnisses zwischen den Widerstandskräften. Ein höherer Einfluss der Blätter als der Äste bei geringen Geschwindigkeiten wurde in WILSON ET AL. (2008) jedoch nicht beobachtet.

Es ist anzumerken, dass bei dieser Betrachtung vernachlässigt wird, dass bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit die Verformung bei den belaubten Elementen höher ist als im entlaubten Zustand. Dieser Einfluss der höheren strömungsgünstigen Verformung (Verringerung des Widerstandsbeiwertes) ist in dem Verhältnis der Widerstandskräfte im be- und entlaubten Zustand enthalten. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit Literaturdaten von FREEMAN ET AL. (2000) ist leider nicht möglich, da die Kraftmessungen von FREEMAN ET AL. (2000) bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten im be- und entlaubten Zustand durchgeführt worden sind.

Die Verknüpfung der in diesen Untersuchungen gemessenen Widerstandskräfte (vgl. Abb. 4.9) mit Vegetationsparameter wie der Blattmasse oder dem Verdrängungsvolumen der Blätter ist aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Laubes der einzelnen Bäume nicht möglich. Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Laubes ergeben daraus, dass sich die Blätter in der Wachstumsphase befanden und die Blätter noch nicht vollständig entwickelt gewesen sind. Weiterhin vergingen zwischen dem Beschnitt der Elemente und den Versuchen bis zu zwei Wochen, was sich deutlich auf die Blattmasse auswirkte (vgl. XAVIER 2010). Außerdem bestand bei den Weiden ein beträchtlicher Anteil der Blattmasse, der nicht näher quantifiziert wurde, aus den Blüten der Weiden wodurch das Ergebnis der Blattmassenmessung verfälscht wurde (vgl. WILSON ET AL. 2010).

4.3 Zusammenfassung

In den Untersuchungen zum Vegetationswiderstand flexibler Einzelelemente wurden Versuche durchgeführt in denen das Widerstandsverhalten künstlicher Elemente mit natürlichen Elementen verglichen wurde. Dabei wurde für die über die Blattfläche normierte Widerstandskraft F_D und den Hebelarm L der resultierenden Kraft die höchste Übereinstimmung zwischen einem künstlichen Pappelzweig und zwei natürlichen Pappelzweigen festgestellt. Der künstliche, flexible Pappelzweig wurde daraufhin für weitere Versuche ausgewählt.

Bei den weiterführenden Untersuchungen mit dem künstlichen Pappelzweig wurde die Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft, der kumulativen Blattfläche und der Strömungsgeschwindigkeit anhand einer neuen, noch nicht in der Literatur vorgestellten Vorgehensweise untersucht. Dabei wurden zwei Mechanismen der Anpassung der Blätter unter Strömungseinfluss erkannt. Für den Fall, dass nur jeweils ein Blatt an einem Ast befestigt ist, rotieren die Äste um die Anschlusspunkte am Stamm, wobei dies ein spezifisches Verhalten des künstlichen Pappelzweiges ist. Befinden sich mehr als zwei Blätter an einem Ast, findet eine gegenseitige Beeinflussung der Blätter statt, wodurch eine Rotation der Äste um die Verbindungspunkte unterbunden wird. Für den Fall, dass die gegenseitige Beeinflussung der Blätter das Widerstandsverhalten dominiert, ist die Widerstandskraft näherungsweise linear abhängig von der kumulativen Blattfläche und das Verhältnis der Widerstandskräfte bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und gleicher Blattfläche ist konstant. Auf Grundlage dieser Beobachtungen konnte eine rein empirische und pflanzenspezifische Gleichung zur Berechnung der Widerstandskraft in Abhängigkeit der einseitigen Blattfläche und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet werden, die eine hohe Genauigkeit aufweist.

Die Untersuchungen über das Verhalten der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der kumulativen Blattfläche und der Strömungsgeschwindigkeit wurde mit drei natürlichen Pappelzweigen fortgeführt. Dabei zeigte sich, dass auch bei den natürlichen Elementen eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Blattfläche ab einer spezifischen kumulativen Blattfläche vorliegt. Die Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Geschwindigkeit wich jedoch von einer linearen Abhängigkeit ab und folgte dem funktionalen Zusammenhang $F_D \propto u^a$ mit Exponenten a zwischen 1,1 und 1,2. Die Vergleichbarkeit zwischen den natürlichen Elementen konnte als gut bezeichnet werden.

In der Literatur lieferte JÄRVELÄ (2006) die einzigen Hinweise zur Vergleichbarkeit des Widerstandsverhaltens künstlicher und natürlicher Vegetation und wies darauf hin, dass sich künstliche Elemente nicht notwendigerweise wie natürliche verhalten müssen. Die Einbeziehung des Vegetationselementes, anhand dessen JÄRVELÄ (2006) zu diesem Ergebnis kam, zeigte wie alle weiteren Elemente auch, eine näherungsweise lineare Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Strömungsgeschwindigkeit. Aus den durchgeführten Versuchsreihen mit den künstlichen und natürlichen flexiblen und belaubten Vegetationselementen kann gefolgert werden, dass die alleinige Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit nicht

ausreichend ist, die Vergleichbarkeit zu bewerten. Aus den weiterführenden Versuchsreihen in Abhängigkeit der kumulativen Blattfläche (vgl. Abschnitt 4.2.1 und Abschnitt 4.2.2) kann für die Vergleichbarkeit zwischen künstlicher und natürlicher Vegetation die Empfehlung gegeben werden diese Untersuchungen durchzuführen, wenn der Einfluss des Stammes gering ist und die Blätter den wesentlichen Anteil am Strömungswiderstand erzeugen.

Von WILSON ET AL. (2008) wurde ein konstantes Verhältnis der Widerstandskräfte im be- und entlaubten Zustand bei vergleichbaren Strömungsgeschwindigkeiten anhand eines Efeuzweiges festgestellt. In der Literatur konnten jedoch keine Hinweise gefunden werden, ob diese Beobachtung auch für Büsche und Bäume zutreffend ist. Dazu wurden in einem Schleppkanal die Widerstandskräfte von be- und entlaubten Büschen und Bäumen untersucht. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein konstantes Verhältnis näherungsweise erreicht wird, wenn die Blätter vollständig stromlinienförmig ausgerichtet sind. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die hier untersuchten Weiden und Erlen in der Wachstumsphase des Laubes getestet worden sind und keine ausgewachsenen Blätter vorhanden waren. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass der Einfluss des Laubes mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt und im Bereich sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten (bis 0,25 m/s), einen höheren Beitrag zur Widerstandskraft leisten kann als die Äste. Weitere Untersuchungen zur Validierung dieser Ergebnisse sind erforderlich, um die Hypothese eines konstanten Verhältnisses zwischen den Widerstandskräften für Vegetationselemente im vollständig belaubten Zustand zu überprüfen.

5 Vegetations- und Sohlenwiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern

Aus der Literaturrecherche resultierend wurde als übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit die Bestimmung des Sohlenwiderstandes in einem durchströmten Bewuchsfeld bestehend aus flexiblen und belaubten Vegetationselementen erarbeitet. Für Bewuchsfelder aus flexiblen und belaubten Vegetationselementen führte bislang nur RIGHETTI (2008) Versuche durch, wobei das Hauptaugenmerk dieser Studie die Beschreibung des turbulenten Strömungsfeldes gewesen ist. Es wurde weiterhin festgestellt, dass bislang kein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Sohlenschubspannungen in Bewuchsfeldern vorliegt. Die theoretische Grundlage für die nachfolgenden Versuchsreihen bildet das Kräftegleichgewicht an einem Volumenelement des durchströmten Bewuchsfeldes nach Gl. (2.7) mit der Randbedingung stationär gleichförmiger Strömungsverhältnisse. Der Gesamtströmungswiderstand setzt sich dabei aus dem Sohlenwiderstand und dem Vegetationswiderstand zusammen.

Da eine direkte Messung des Sohlenwiderstandes äußerst schwierig umzusetzen ist, wurde ein innovativer Versuchsaufbau entwickelt, der in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde und zusammen mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Kraftmessgeräten die Bestimmung des Gesamtwiderstandes und des Vegetationswiderstandes ermöglicht. Daraus resultierend kann unter Verwendung von Gl. (2.7) und unter Vernachlässigung der Wandrauheit die Sohlenschubspannung indirekt berechnet werden.

Entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 4 steht ein künstliches flexibles und belaubtes Vegetationselement zur Verfügung, welches systematische Untersuchungen in Abhängigkeit der identifizierten Einflussgrößen erlaubt. Der Sohlenwiderstand wird in den folgenden Abschnitten in Abhängigkeit der Vegetationsdichte und -anordnung (Abschnitt 5.1) sowie in Abhängigkeit der Sohlenrauheit (Abschnitt 5.2), in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe (Abschnitt 5.3) und in Abhängigkeit der vertikalen Verteilung der Blattfläche (Abschnitt 5.4) untersucht. Die Untersuchung des Einflusses der Flexibilität auf den Sohlenwiderstand erfolgt durch Vergleichsmessungen mit starren Zylindern.

Weiterhin werden in Abschnitt 5.5 die Messergebnisse dieser Untersuchungen mit den Berechnungsergebnissen aus Ansätzen zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes in einem Bewuchsfeld gegenübergestellt. Dabei werden auch speziell entwickelte Ansätze, wie z.B. der Ansatz von RAUPACH (1992) und der Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) angewendet. Weiterhin erfolgt eine Gegenüberstellung des berechneten Sohlenwiderstandes mit der turbulenten kinetischen Energie (TKE) des sohlennahen turbulenten Strömungsfeldes.

5.1 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der Vegetationsdichte und –anordnung

Um den Sohlen- und den Vegetationswiderstand zu bestimmen und deren Abhängigkeit von den Vegetationsparametern zu untersuchen, wurden zunächst die Parameter Vegetationsdichte und Vegetationsanordnung in Verbindung mit der rauen Sohle variiert (3 mm pyramidenförmige Rauheitselemente, vgl. Abb. A 10). Dazu wurden bis zu 450 künstliche Pappelzweige in die Versuchsrinne eingebaut. Insgesamt wurden drei verschiedene Vegetationsdichten dicht, mittel und licht mit 44,4, 25 und 11,1 Vegetationselementen/m² und den Abständen $a_x/a_y = 0,15/0,15$ m, $0,2/0,2$ m und $0,3/0,3$ m untersucht, wobei jeweils zwischen einer Reihenanordnung (L, inline) und einer versetzten Anordnung (S, staggered) unterschieden wurde. Für die dichte, mittlere und lichte Vegetationsdichte beträgt der Blattflächenindex LAI = 0,98, 0,75 und 0,44. Aus dieser Parameterkombination ergeben sich sechs Versuchsreihen (30S, 30L, 20S, 20L, 15S, 15L) in denen jeweils 5 bis 7 unterschiedliche mittlere Fließgeschwindigkeiten untersucht worden sind. In Abb. 5.1 sind die untersuchten Vegetationsdichten und –anordnungen als Draufsicht im 1,5 m langen Messbereich dargestellt (Fotografien der Anordnungen befinden sich im Anhang in Abb. A 11). Die Abbildung vermittelt einen Eindruck der Vegetationsdichte mit den künstlichen, belaubten Pappelzweigen. An den farbig unterlegten Vegetationselementen wurden die Kraftmessungen durchgeführt. Bei der Anordnung 30S konnte der Vegetationswiderstand nur auf Grundlage von acht Kraftmessungen bestimmt werden. Bei der versetzten Anordnung der Vegetationselemente mussten in jeder zweiten Reihe zwei Elemente dicht an der Rinnenwand positioniert werden. Um eine konstante Vegetationsdichte und homogene Blattflächenverteilung zu gewährleisten, wurden sechs der zwölf Blätter von diesen „halben“ Pflanzen entfernt. Außerdem wurde die Blüte von jeder zweiten „halben“ Pflanze entfernt. Der zusätzliche Stamm in jeder zweiten Reihe beeinflusst den Gesamtströmungswiderstand aufgrund des geringen Durchmessers nur geringfügig (vgl. Abschnitt 4.2.1). Auf die Ausrichtung der künstlichen Pappelzweige wurde ein besonderes Augenmerk gelegt, weil die Belastungsrichtung infolge der individuellen Blattausrichtung die Widerstandskraft beeinflussen kann. Daher wurden alle Vegetationselemente so ausgerichtet, dass der unterste Ast in Strömungsrichtung zeigte. Weiterhin waren die Vegetationselemente im Messbereich den Kraftmessgeräten fest zugeordnet, damit systematische Abweichungen der Widerstandskräfte besser analysiert werden konnten. Die Datenrate der Messungen im Bewuchsfeld betrug 200 Hz je Kraftmessgerät und es wurden drei Einzelmessungen mit einer Messdauer von jeweils 60 Sekunden durchgeführt. Im Anhang ist eine Analyse der erforderlichen Messdauer beschrieben. Die Versuchsdurchführung ist in Abschnitt 3.2 beschrieben.

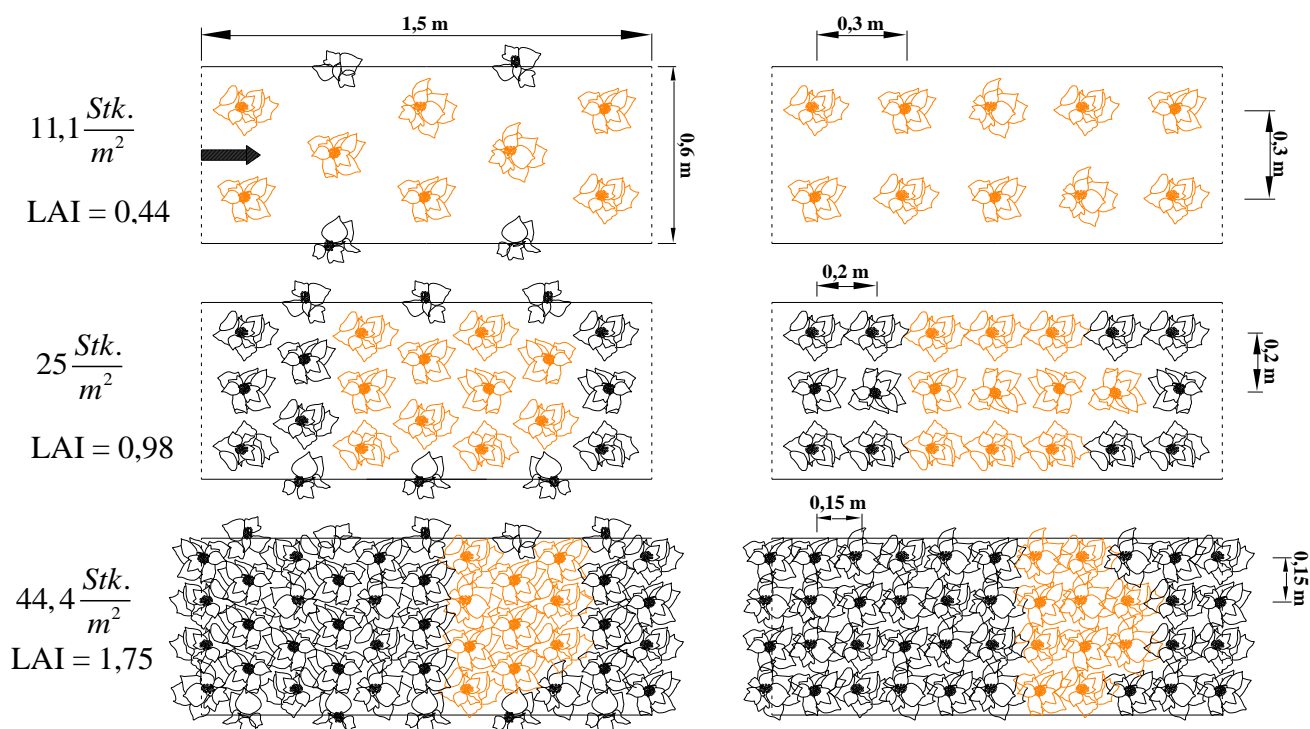


Abb. 5.1 Draufsicht des Messbereichs und Darstellung der verschiedenen Vegetationsanordnungen. Versetzte Anordnung links, Reihenanordnung rechts. Abstände a_x und a_y von oben nach unten: 30, 20, 15 cm. Farblich hervorgehobene Vegetationselemente sind an Kraftmessgeräte angeschlossen. Dargestellt sind künstliche Pappelzweige.

Der Einfluss von Flexibilität und Belaubung auf Form- und Oberflächenwiderstand wird durch Vergleichsmessungen mit starren Vegetationselementen in der Form von Kunststoffzylindern mit einem Durchmesser $d = 1,0$ cm, einer Höhe von 23,5 cm und der rauen, pyramidenförmigen Sohlenoberfläche untersucht. Dabei werden zwei Versuchsreihen bei einer Dichte $a_x = a_y = 20$ cm und mit der Reihenanordnung und der versetzten Anordnung durchgeführt (Datenreihenbezeichnungen „20L_Zyl“ und „20S_Zyl“). Eine Draufsicht des Messbereichs mit den Zylinderanordnungen ist in Abb. 5.2 dargestellt. Es werden die gleichen Zylinder wie in den Untersuchungen von LINDNER (1982) und SPECHT (2002) verwendet. Die Versuche mit starren Vegetationselementen sollen zusätzlich die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieser Untersuchungen mit den zahlreichen in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen herstellen.

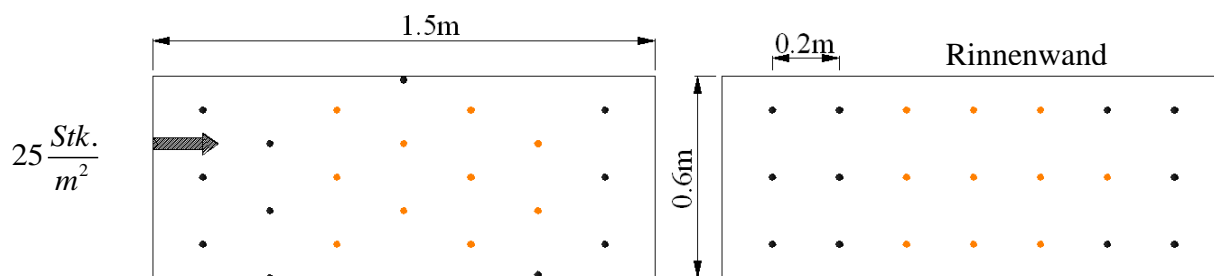


Abb. 5.2 Draufsicht des Messbereichs und Darstellung der verschiedenen Vegetationsanordnungen. Versetzte Anordnung links, Reihenanordnung rechts. Abstände $a_x = a_y = 20$ cm. Farblich hervorgehoben sind Vegetationselemente, an Kraftmessgeräte angeschlossen sind. Dargestellt sind starre Zylinder.

Alle Untersuchungen wurden bei Normalabflussbedingungen durchgeführt. In den Versuchsreihen mit gerade überströmten Vegetationselementen wurden Durchfluss, Rinnenneigung und die Fließtiefe so angepasst, dass die geneigten Vegetationselemente gerade überströmt waren und die Neigung der Wasserspiegellage mit der Rinnenneigung übereinstimmte. Die Fließtiefe war bei diesen Versuchsreihen ungefähr 2 cm höher als die geneigte Pflanzenhöhe. Dies sollte verhindern, dass die obersten Blätter, welche durch die Strömungskräfte in Richtung Wasserspiegeloberfläche gedrückt wurden, durch diese hinausragten und die angeströmte Blattfläche dadurch variierte. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m wurde aus der Kontinuitätsgleichung $u_m = Q/A$ unter Verwendung der mittleren Fließtiefe h ermittelt.

5.1.1 Vegetationswiderstand

Das Widerstandsverhalten einzelner künstlicher Pappelzweige und starrer Zylinder wurde in einer offenen Gerinneströmung untersucht und im vorangegangenen Kapitel 4 detailliert beschrieben. Die Widerstandskräfte können jedoch durch die Interaktion zwischen der Strömung und den einzelnen Vegetationselementen im Bewuchsfeld variieren. Insbesondere stellt sich die Frage nach der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen, dem Widerstandsverhalten einzelner Vegetationselemente und dem räumlich gemittelten Verhalten. Dabei spielt insbesondere die zeitliche und räumliche Variabilität des Widerstandsverhaltens eine Rolle, da hierdurch die Frage der Notwendigkeit der synchronen Messung mehrerer Vegetationselemente beantwortet werden kann. Im Folgenden werden die Kraftmessungen der vollständig belaubten flexiblen künstlichen Pappelzweige und der starren Zylinder vorgestellt und analysiert.

5.1.1.1 Widerstandskräfte

Zeitliche Variabilität der Widerstandskräfte

Für die Beschreibung der Streubreite der Widerstandskräfte vom Mittelwert innerhalb der Messdauer von 60 Sekunden wurde die Standardabweichung der Widerstandskräfte für jede Messreihe mit den künstlichen Vegetationselementen berechnet. Die Standardabweichung der drei Einzelmessungen wurde gemittelt und in Abb. 5.3a in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für die Versuchsreihen 30L (offene Symbole) und 30S (volle Symbole) dargestellt. Unabhängig von der Anordnung steigt die Standardabweichung mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und weist tendenziell höhere Werte für die Reihenanordnung als für die versetzte Anordnung auf. Obwohl die Standardabweichung für die Mehrzahl der Vegetationselemente gering ist, weisen einzelne Messungen deutlich höhere Werte auf, wobei dies nicht auf eine systematische Abweichung eines Kraftmessgerätes oder Vegetationselementes zurückgeführt werden konnte. Abb. A 14 im Anhang zeigt für alle Versuchsreihen vergleichbare Ergebnisse. Die räumliche Mittelung der Standardabweichung der Einzelmessungen für alle Versuchsreihen ist in Abb. 5.4a dargestellt. Die Abbildung bestätigt die Tendenz einer mit u_m leicht steigenden Standardabweichung und höherer Werte bei der Reihenanordnung als bei der versetzten Anordnung.

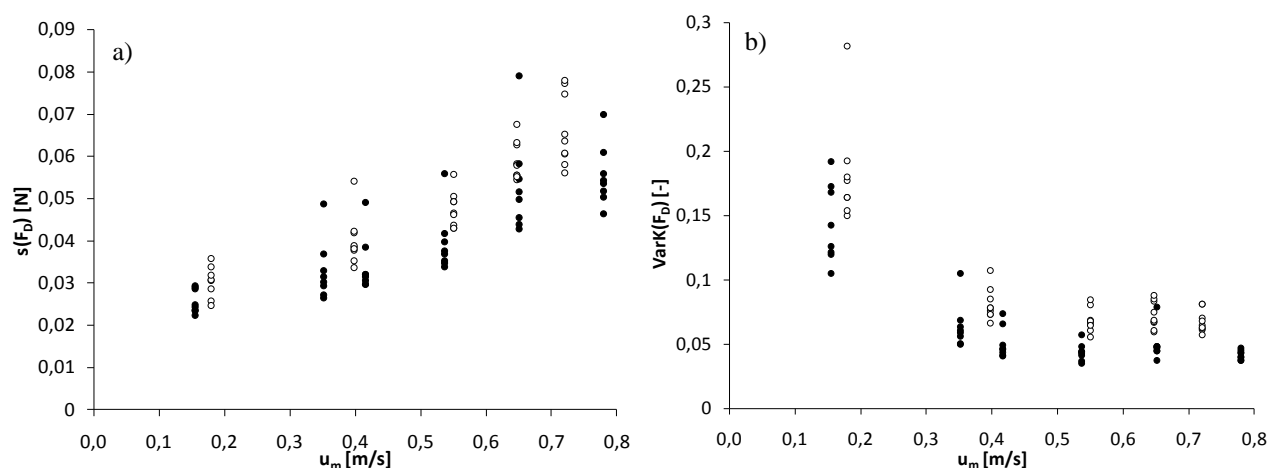


Abb. 5.3 (a) Standardabweichungen und (b) Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte mit einer Messdauer von 60 Sekunden für die Anordnungen 30S (volle Kreise, 8 DFS) und 30L (offene Kreise, 10 DFS) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

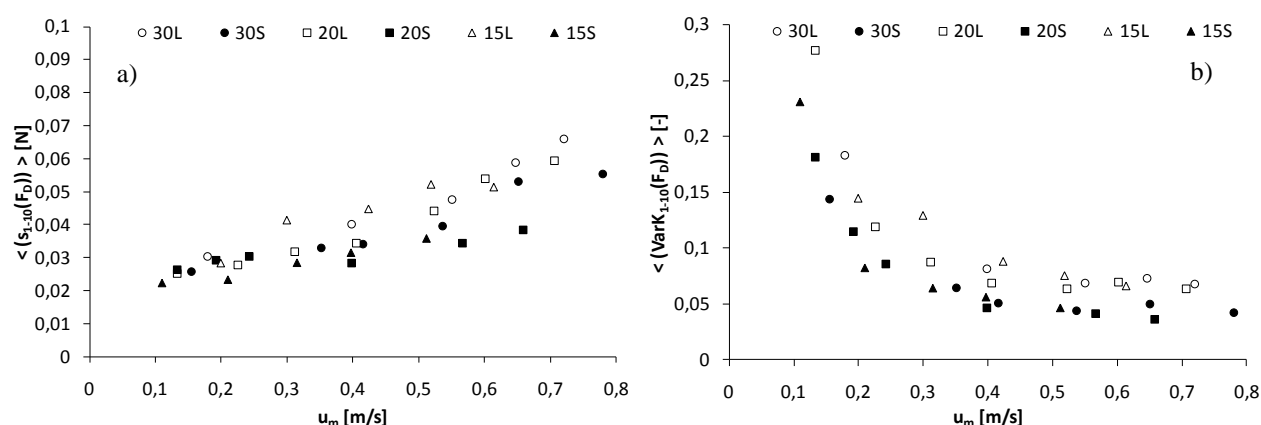


Abb. 5.4 (a) Mittelwerte der Standardabweichung und (b) des Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Messdauer der Zeitreihen betrug 60 Sekunden, bei der Reihenanordnung wurde mit 10 DFS und bei der versetzten Anordnung mit 8 DFS gemessen.

Der Variationskoeffizient ist in Abb. 5.3b für die Anordnungen 30L und 30S und in Abb. 5.4b als räumlicher Mittelwert für alle Versuchsreihen mit den künstlichen Pappelzweigen dargestellt. Der Variationskoeffizient wird auch als normalisierter Standardfehler bezeichnet und ist definiert als die Standardabweichung der Messungen dividiert durch den individuellen zeitlichen Mittelwert (BENDAT & PIERSOL 2000). Abb. 5.4b zeigt, dass mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und damit auch mit steigenden Widerstandskräften der Variationskoeffizient sinkt. Das bedeutet, dass bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten die Streuung einen größeren Einfluss hat, als bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten. Eine Abbildung mit den Werten aller Versuchsreihen der künstlichen Pappel ist im Anhang in Abb. A 15 dargestellt. Die räumliche Mittelung des Variationskoeffizienten zeigt deutlicher als die Standardabweichung höhere Werte für die Reihenanordnung als für die versetzte Anordnung. Die zeitliche Variabilität der Widerstandskräfte ist also abhängig von der Anordnung. Diese Unterschiede können jedoch nicht auf die gegenseitige Beeinflussung der Vegetationselemente zurückgeführt werden, da die Dichte offensichtlich keinen

Einfluss auf die Variabilität hat. Letztendlich kann die Ursache für das unterschiedliche Verhalten bei versetzter und Reihenanordnung an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Im Unterschied zu den Messungen mit der künstlichen Pappel wird die zeitliche Variabilität der starren Zylinder durch eine periodische Schwingung der Zylinder beeinflusst. Die Schwingungen wirken sich auf die Standardabweichung der Widerstandskräfte (Abb. 5.5a) und den Variationskoeffizienten (Abb. 5.5b) aus. Auffällig sind die sehr viel höheren Werte bei versetzter Anordnung als bei der Reihenanordnung für die Strömungsgeschwindigkeiten 0,6 und 0,7 m/s (siehe Abb. 5.5a). Die hohe Streubreite ist dabei auf das individuelle Schwingungsverhalten der Messsysteme (DFS – Zylinder) zurückzuführen. Die Schwingungen bewirken, dass die Standardabweichung um bis zum Faktor sechs höher ist als der Mittelwert der Kraftmessungen (vgl. Abb. 5.5b). Im Vergleich zu den Ergebnissen in Abb. 5.3a der flexiblen Elemente werden bei den starren Zylindern Vielfache der Werte der flexiblen Elemente erreicht. Die hohe Flexibilität und das stromlinienförmige Verhalten der flexiblen Elemente wirken sich „stabilisierend“ auf das Verhalten in der Strömung aus.

Im Vergleich zu systematischen Untersuchungen und Messungen der periodischen Schwingungen von Zylindern, welche in Abschnitt 2.1.1 beschrieben wurden, treten hier Besonderheiten auf, die eine Interpretation und den direkten Vergleich mit Literaturdaten verhindern, da eine gleichmäßige Oszillation der Zylinder in alle Richtungen nicht möglich ist. Durch den speziellen Aufbau der Kraftmessgeräte, welcher eine Auslenkung des Kraftmessgerätes in Strömungsrichtung ermöglicht und quer zur Strömungsrichtung verhindert, wird die Schwingung des Zylinders, der in der Kopfplatte des Kraftmessgerätes fest eingespannt ist, signifikant beeinflusst. Gegenüber Messeinrichtungen, bei welchen die Zylinder in beide Richtungen elastisch gelagert sind, tritt daher eine veränderte und nicht näher definierbare oszillierende Bewegung auf. Die oszillierende Bewegung ist nicht näher definierbar, da mit den Kraftmessgeräten nur der Anteil der in Strömungsrichtung wirkenden fluktuierenden Kräfte und nicht der quer zur Strömungsrichtung wirkenden Kräfte bestimmt werden kann.

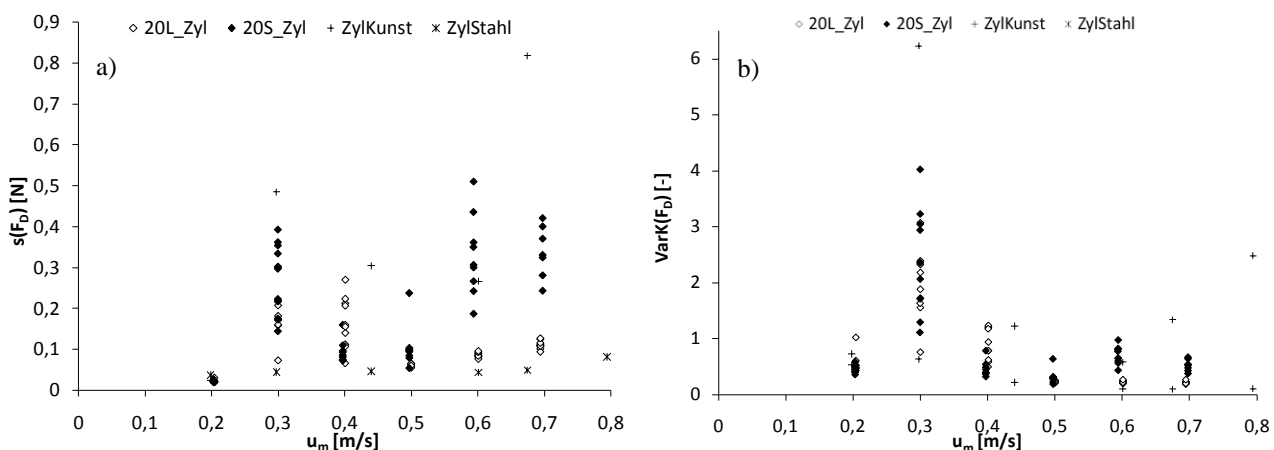


Abb. 5.5 (a) Standardabweichungen und (b) Variationskoeffizienten der Zeitreihen der Widerstandskräfte mit einer Messdauer von 60 Sekunden für die Anordnungen 20L_Zyl (offene Rauten, 10 DFS) und 20S_Zyl (geschlossene Rauten, 10 DFS) sowie der einzelnen Zylinder aus Stahl (ZylStahl) und Kunststoff (ZylKunst) in einer ungestörten Strömung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

In Abb. 5.5a und b sind weiterhin Werte für Messungen mit einzelnen isolierten Zylindern, welche sich ausschließlich durch ihre Materialeigenschaften unterscheiden, dargestellt. Der Kunststoffzylinder „ZylKunst“ ist identisch mit den im Bewuchsfeld eingesetzten Zylindern, während der zweite Zylinder „ZylStahl“ aus Stahl bestand. Beide Zylinder hatten eine Höhe von 23,5 cm und einen Durchmesser von 1,0 cm. Die beiden zusätzlichen Versuchsreihen wurden unter identischen Randbedingungen mit konstanten Fließtiefen $h = 25$ cm durchgeführt. In Abb. 5.5a ist ein Wert der Datenreihe „ZylKunst“ nicht dargestellt, da aufgrund dieses sehr hohen Wertes die notwendige Skalierung der Ordinate die Übersichtlichkeit stark reduzieren würde. Dieser Datenpunkt erreicht für $u_m = 0,79$ m/s einen Wert $s = 2,37$ N.

Die Abbildungen Abb. 5.5a und b zeigen, dass zwischen den einzelnen Zylindern aus Kunststoff und Stahl ein beträchtlicher Unterschied besteht, wobei wesentlich höhere Werte der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten beim Kunststoffzylinder erhalten werden. Diese können auf die geringere Masse des Zylinders zurückgeführt werden, welche das Schwingungsverhalten wesentlich beeinflusst. Die Abbildungen zeigen ebenfalls, dass die Messungen mit dem Kunststoffzylinder einer beträchtlichen Streubreite unterliegen. Mit Variationskoeffizienten, die Werte von bis zu 4 - 6 erreichen wird deutlich, dass die Amplituden der Schwingungen die Auslenkung des Zylinders infolge der mittleren Widerstandskraft um ein Vielfaches übersteigen. Im Vergleich zu den Messungen mit den künstlichen Pappelzweigen sind die Werte des Stahlzylinders jedoch ebenfalls als hoch zu bewerten.

Die Schwingungen der Zylinder wirken sich im Allgemeinen auf eine Erhöhung des Widerstandsbeiwertes C_D und der Widerstandskraft F_D aus (CHEN, 1985), was nachfolgend und in Abschnitt 5.1.1.2 näher erläutert wird.

Räumliche Variabilität der Widerstandskräfte

In Abb. 5.6b sind die Widerstandskräfte der künstlichen Pappeln (zeitlich gemittelt) für die Anordnungen 30S (volle Symbole) und 30L (offene Symbole) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Darstellung ist repräsentativ für alle Anordnungen und Versuchsreihen mit den künstlichen Pappelzweigen und zeigt eine hohe Variabilität der Widerstandskräfte, die mit steigender Strömungsgeschwindigkeit größer wird und unabhängig von der Anordnung ist.

Die Widerstandskräfte der Vegetationselemente in den Kraftmessgeräten DFS01-05 bei der Anordnung 30S sind in Abb. 5.6a in Abhängigkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Darstellung der Anzahl der Datenreihen wurde zur Verbesserung der Übersichtlichkeit in dieser Abbildung auf die Daten von fünf Messgeräten reduziert. Die Abbildung zeigt, dass der Gradient der Verbindungslinien, welche die einzelnen Datenpunkte der Elemente miteinander verbinden, zwischen den Elementen und den Datenpunkten variiert. Diese Variation ist auf das individuelle Verhalten der künstlichen Pappelzweige und auf die räumliche Heterogenität der Strömung zurückzuführen. Obwohl identische Vegetationselemente in den Versuchen verwendet worden sind, die Vegetationselemente der Kraftmessgeräten fest zugeordnet waren und die

Elemente in allen Versuchsreihen identisch ausgerichtet waren, weicht das stromlinienförmige Verhalten der Elemente voneinander ab (vgl. Abschnitt 5.1.1.2). Das individuelle Verhalten der Elemente kann auf die hohe Flexibilität der Blätter zurückgeführt werden. Die Blätter können sich individuell am Stamm bewegen, sodass einzelne Blätter sich bspw. vor den Stamm legen und damit einen höheren Widerstand bewirken. Dadurch erzeugen sie größere Abschattungseffekte auf stromabwärts positionierte Pflanzen. Weiterhin resultieren Unterschiede im Verhalten der einzelnen Elemente aus der räumlichen Heterogenität der Strömung im Bewuchsfeld. Obwohl die Variabilität der Widerstandskräfte der einzelnen Vegetationselemente hoch ist, weist die räumlich gemittelte Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit auf (vgl. SCHONEBOOM ET AL. 2010a). Die Widerstandskräfte aller weiteren Versuchsreihen mit den künstlichen Pappelzweigen sind im Anhang in Abb. A 13 dargestellt und zeigen vergleichbare Ergebnisse. Vergleichbare Ergebnisse zeigen auch die Widerstandskräfte der Versuchsreihen mit den starren Zylindern (Abb. A 16 im Anhang) mit dem Unterschied, dass die räumliche Variabilität der Widerstandskräfte geringer ist, als bei den künstlichen Pappeln.

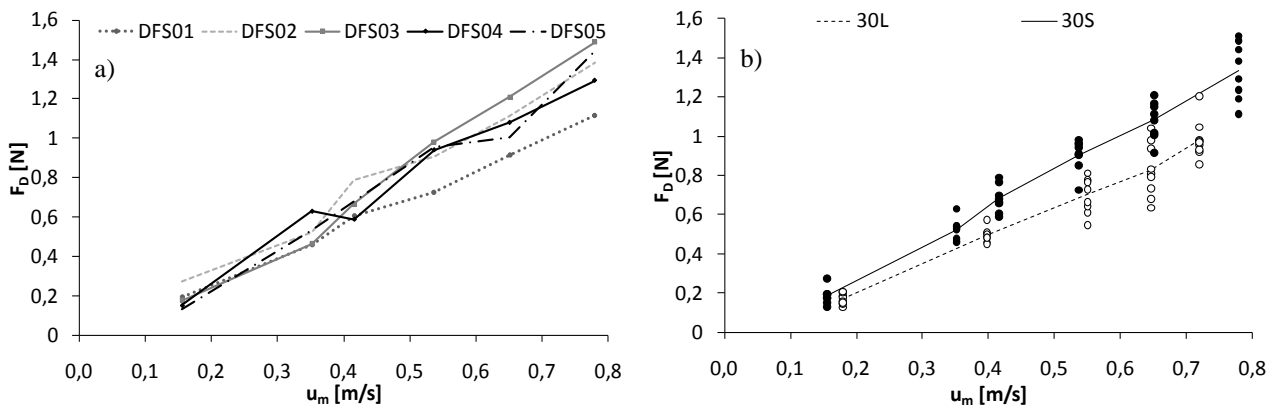


Abb. 5.6 Räumliche Variabilität der Widerstandskräfte der künstlichen Pappeln. (a) DFS01 bis DFS05 bei Anordnung 30S, (b) DFS01 bis DFS10 für die Anordnungen 30S (volle Kreise) und 30L (offene Kreise) sowie räumlich gemittelte Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ (Linien).

Für die Angabe der Streubreite der Widerstandskräfte $F_{D,i}$ ($i = 1-10$) um den räumlichen Mittelwert der Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ ist in Abb. 5.7a die empirische Standardabweichung der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für die flexiblen und starren Elemente dargestellt. Die Streubreite der Widerstandskräfte der flexiblen Elemente vom räumlichen Mittelwert nimmt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit absolut gesehen zu (vgl. auch Abb. 5.6b) und ist unabhängig von der Vegetationsdichte und der -anordnung. Der Anstieg der Standardabweichung der starren Zylinder ist im Vergleich zu den flexiblen Elementen geringer, was darauf zurückzuführen ist, dass die Streubreite der Zylinder gänzlich auf die Variabilität der Strömung zurückzuführen ist. Die Variabilität der flexiblen Elemente wird jedoch zusätzlich durch das individuelle Verhalten beeinflusst.

Weiterhin ist in Abb. 5.7b zum Vergleich der Versuchsreihen untereinander der Variationskoeffizient, also die Standardabweichung bezogen auf den räumlichen Mittelwert der Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ der flexiblen und starren Elemente dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass der Variationskoeffizient

fizient mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sinkt und ab ca. 0,4 m/s näherungsweise konstant ist. Während für $u_m > 0,2$ m/s die Streubreite zwischen 6 und 18 % des räumlichen Mittelwertes $\langle F_D \rangle$ liegt, sind für $u_m < 0,2$ m/s höhere Werte zu verzeichnen. Dies kann auf das flexible Verhalten der Elemente zurückgeführt werden. Bei geringen Geschwindigkeiten ist die Verformung der Blätter noch gering, wodurch eine höhere Variabilität der Widerstandskräfte vorliegt. Bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten sinkt diese Variabilität zunehmend. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass die Variabilität unabhängig von der Dichte und der Anordnung ist.

Im Vergleich zu den flexiblen Elementen sind die Variationskoeffizienten der starren Elemente tendenziell niedriger, da der Variationskoeffizient der starren Elemente auf die Variabilität der Strömung zurückzuführen ist und nicht wie bei den flexiblen Elementen zudem auf ein individuelles Verformungsverhalten (vgl. Abschnitt 5.1.1.2).

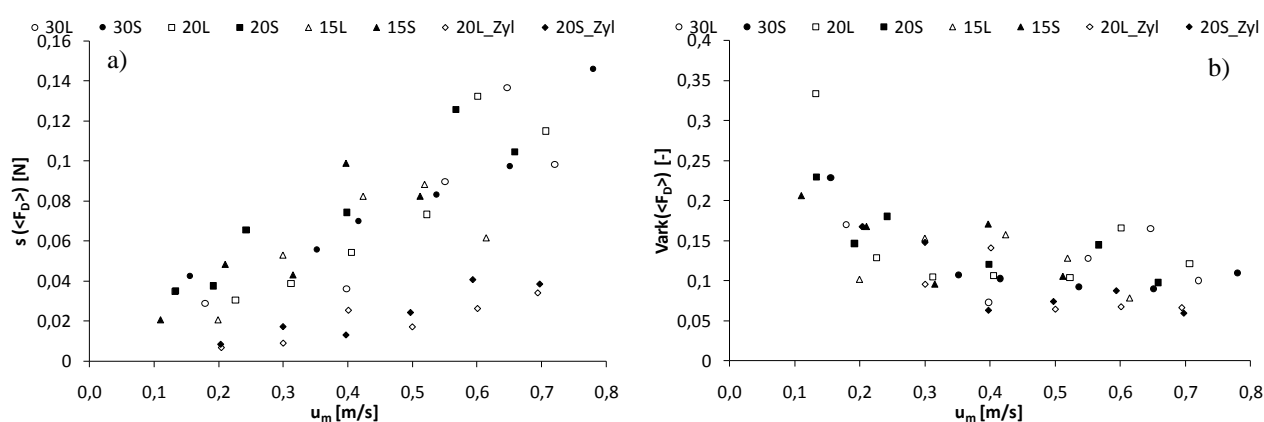


Abb. 5.7 Räumliche Variabilität der Widerstandskräfte der künstlichen Pappeln und der starren Zylinder. (a) Standardabweichung, (b) Variationskoeffizient in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

Räumlich gemittelte Widerstandskräfte

Die räumlich gemittelten Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$, also die Mittelwerte aus den 10 Kraftmessungen je Versuch, der flexiblen Elemente sind für die Anordnungen 15L, 15S, 20L, 20S, 30L und 30S und für die Zylinderanordnungen 20L_Zyl und 20S_Zyl in Abb. 5.8 dargestellt. Zusätzlich sind die Widerstandskräfte der Versuchsreihen mit einem einzelnen Pappelzweig („Pappel“) und dem einzelnen Kunststoffzylinder („ZylKunst“) sowie dem Stahlzylinder („ZylStahl“) dargestellt. Die Versuchsreihen mit den Einzelementen wurden unter identischen Randbedingungen und konstanter Fließtiefe $h = 25$ cm durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem einzelnen künstlichen Pappelzweig wurden bereits in Abschnitt 4.1 detailliert diskutiert.

Zunächst werden die Ergebnisse mit den flexiblen Pappelzweigen diskutiert. Abb. 5.8 zeigt, dass die Beziehung zwischen Widerstandskraft und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit bei allen Versuchsreihen mit den flexiblen Elementen näherungsweise linear ist. Weiterhin schneidet eine lineare Verlängerung der Versuchsreihen für sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten die Ordinate nicht im Ursprung sondern unterhalb des Ursprunges. Dies weist darauf hin, dass im Bereich sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten eine quadratische Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit besteht und sich die Vegetationselemente in diesem

Bereich wie ein starres Element verhalten. Die Strömungskräfte reichen in diesem Bereich nicht aus, eine Verformung der Vegetationselemente herbeizuführen (vgl. SCHONEBOOM ET AL. 2010b).

Die Ergebnisse in Abb. 5.8 weisen weiterhin darauf hin, dass die Widerstandskräfte der künstlichen Pappelzweige für die gleiche Anordnung und vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der Vegetationsdichte sind. Weiterhin liegt eine hohe Übereinstimmung zwischen den Widerstandskräften des Einzelelementes und der Reihenanordnung bei vergleichbaren Strömungsgeschwindigkeiten vor. Dieses Ergebnis ist jedoch ein Resultat der Versuchsdurchführung und ist darauf zurückzuführen, dass beim Einzelelement die Fließtiefe konstant bei 25 cm gehalten wurde und nicht wie im Bewuchsfeld der geneigten Pflanzenhöhe entsprochen hat. Daraus resultiert, dass die Anströmgeschwindigkeit des Elementes geringer ist als die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit u_m . Unter Beachtung dieser Besonderheit müssten sich die Widerstandskräfte des Einzelelementes zwischen denen bei versetzter Anordnung und Reihenanordnung befinden.

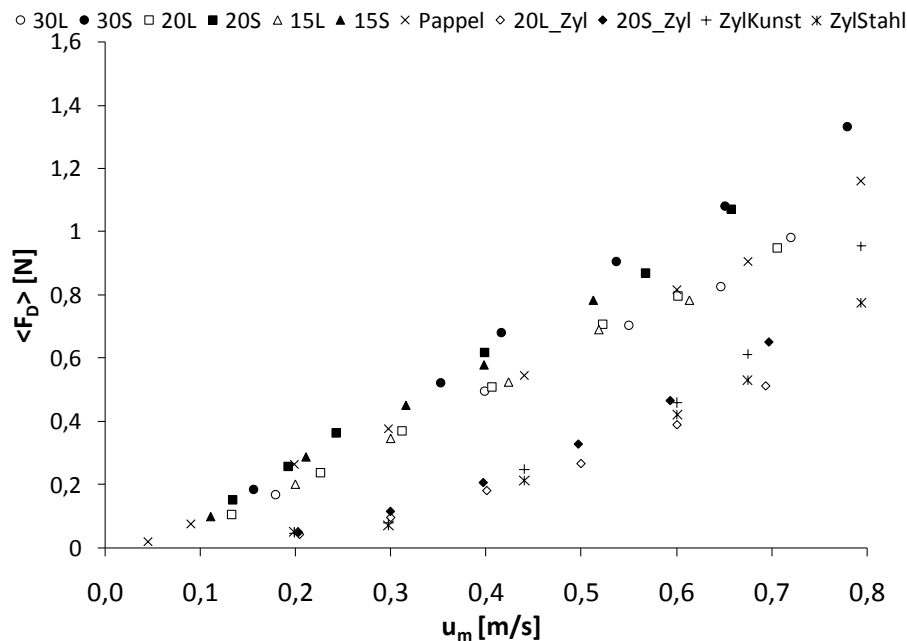


Abb. 5.8 Räumlich gemittelte Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m für die Versuchsreihen der künstlichen Pappeln und der Zylinder im Bewuchsfeld sowie der drei isolierten Einzelelemente: künstliche Pappel, Kunststoffzylinder und Stahlzylinder.

Werden die Widerstandskräfte in Abb. 5.8 über der Anströmgeschwindigkeit aufgetragen, die jedoch in den Versuchen nicht ermittelt werden konnte, ist zu erwarten, dass die Widerstandskraft unabhängig von der Anordnung und der Dichte ist und zusammen auf eine Linie mit dem Einzelelement fällt. Diese Erwartung resultiert direkt aus dem Ansatz von LINDNER (1982).

Neben den Versuchsreihen „20L_Zyl“ und „20S_Zyl“ im Bewuchsfeld sind auch die Widerstandskräfte der einzelnen Zylinder „ZylKunst“ und „ZylStahl“ in Abb. 5.8 dargestellt. Wie erwartet sind die Widerstandskräfte der versetzten Anordnung höher als die der Reihenanordnung. Weiterhin sind die Widerstandskräfte des einzelnen Stahlzylinders höher als die Widerstandskräfte der Reihenanordnung und niedriger als die der versetzten Anordnung, was ein plausibles und ebenfalls zu

erwartendes Ergebnis darstellt. Die Widerstandskräfte des einzelnen Kunststoffzylinders sind jedoch deutlich höher als die des Stahlzylinders, was auf die strömungsinduzierte Schwingungen des Kunststoffzylinders und der damit verbundenen Erhöhung des Widerstandsbeiwertes zurückgeführt werden kann. Auch für die starren Elemente ist zu erwarten, dass die Widerstandskräfte unabhängig von der Anordnung und der Dichte sind, wenn u_m durch die reale Anströmgeschwindigkeit ersetzt wird.

Die Abhängigkeit der Widerstandskräfte der starren Elemente von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ist im Unterschied zu den flexiblen Elementen näherungsweise quadratisch ($F_{\text{Reihe}} = 1,12 u_m^{2,06}$, $F_{\text{versetzt}} = 1,39 u_m^{2,08}$). Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Resultaten von LI & SHEN (1973) und LINDNER (1982).

Gegenüber der hier gezeigten Abhängigkeit von der Vegetationsanordnung stellte JÄRVELÄ (2002) in seinen Versuchen keinen Einfluss der Vegetationsanordnung auf den Vegetationswiderstand fest. In den Versuchen war die Vegetationsdichte jedoch so hoch, dass sich die Äste von benachbarten natürlichen Weidenzweigen überschneiden. Daraus kann gefolgert werden, dass der Einfluss der Vegetationsanordnung auf die Höhe der Widerstandskraft abhängig von der Vegetationsdichte, der Elementstruktur und der Strömungsgeschwindigkeit ist. Eine klare Abgrenzung bzw. ein Kriterium, welche Kombination der Vegetationsstruktur und der Dichte zu unabhängigen Ergebnissen von der Anordnung führt, liegt bislang nicht vor. Für die künstlichen Pappelzweige wurde diese Kombination bei einer Dichte von bis zu 44,4 Elementen/m² nicht erreicht.

Zur Ermittlung des Verhältnisses der Widerstandskräfte in Abhängigkeit der Anordnung wurden zwei lineare Regressionsanalysen mit den Widerstandskräften der künstlichen Pappelzweige der gleichen Anordnung aber unterschiedlichen Dichten durchgeführt, wobei Bestimmtheitsmaße mit Werten $R^2 > 0,99$ ermittelt wurden. Aus den Regressionsgeraden ergibt sich ein näherungsweise konstantes Verhältnis zwischen versetzter und Reihenanordnung mit dem Faktor 1,22. Bei den Versuchsreihen mit den starren Zylindern konnte das Verhältnis bei nahezu identischen Strömungsgeschwindigkeiten direkt berechnet werden. Der Quotient zwischen versetzter und Reihenanordnung liegt im Mittel ebenfalls bei einem Wert 1,22.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Anordnung auf die Widerstandskräfte in Widerstandsfunktionen berücksichtigt werden muss. Weiterhin weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Unterschiede zwischen versetzter Anordnung und Reihenanordnung vereinfachend durch einen konstanten Faktor berücksichtigt werden können. Eine genaue Bestimmung des Einflusses einer beliebigen Anordnung ist jedoch nur unter Berücksichtigung der Charakteristiken der Nachlaufströmung hinter den Elementen möglich. Für starre Zylinder bieten die Verfahren von LI & SHEN (1973) und LINDNER (1982) diese Möglichkeit.

5.1.1.2 Widerstandsbeiwerte C_D und frontal projizierte Flächen A_P

Räumliche Variabilität der frontal projizierten Flächen A_P und der Widerstandsbeiwerte C_D

Die Bestimmung der frontal projizierten Flächen der Pappelzweige erfolgte durch eine fotografische Momentaufnahme der einzelnen Pflanzenelemente mit einer Unterwasserkamera entsprechend der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Vorgehensweise. Eine visuelle Beobachtung der Variabilität der angeströmten Fläche der individuellen Elemente zeigte, dass A_P nur geringfügigen Schwankungen unterliegt und in guter Näherung durch eine Momentaufnahme bestimmt werden kann.

Der individuelle, zeitlich gemittelte Widerstandsbeiwert C_D der Vegetationselemente wurde mit Gl. (2.2) unter Verwendung von $A = A_P$ und $u = u_m$ berechnet. Für die Anordnungen 30S und 30L sind die frontal projizierten Flächen A_P und die berechneten Widerstandsbeiwerte C_D in Abb. 5.9 dargestellt. Für alle weiteren Anordnungen sind die Ergebnisse im Anhang in Abb. A 17 und Abb. A 18 dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass für die individuellen Elemente A_P stark variiert und diese Variation unabhängig von der Anordnung ist. Weiterhin ist A_P selbst unabhängig von der Vegetationsanordnung. Resultierend aus den geringeren Widerstandskräften bei der Reihenanordnung und von der Anordnung unabhängigen A_P -Werten, werden geringere Widerstandsbeiwerte C_D für die Reihenanordnung als bei versetzter Anordnung berechnet (vgl. Abb. 5.9b). In Abb. 5.10 sind A_P und C_D der Kraftmessgeräte DFS01-05 bei der Anordnung 30S dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Variabilität nicht auf eine Systematik, also bestimmte Vegetationselemente zurückzuführen ist.

Die Variabilität der Widerstandskräfte F_D wurde auf das individuelle Verhalten der einzelnen Vegetationselemente zurückgeführt. Dies wird durch die Messungen von A_P bestätigt. Die Variabilität von A_P ist neben dem individuellen Verhalten auch von der Heterogenität des Strömungsfeldes im Bewuchsfeld abhängig, wobei zwischen Strömungsfeld und Vegetation eine gegenseitige Beeinflussung besteht. Diese Wechselwirkung wirkt sich zudem auf den Widerstandsbeiwert C_D der Vegetationselemente aus. Da die Pappelzweige hauptsächlich aus sehr flexiblen Blättern bestehen, die für den wesentlichen Teil der induzierten Widerstandskräfte verantwortlich sind, müssten mit den identischen Pflanzen und vergleichbaren Strömungsverhältnissen bei geringen A_P -Werten auch geringe C_D -Werte auftreten und umgekehrt. Ein direkter Vergleich zwischen A_P und C_D in Abb. 5.10 zeigt jedoch, dass dies nicht immer zutreffend ist. Dies ist auf die räumliche Heterogenität des Strömungsfeldes zurückzuführen.

Da die Widerstandsbeiwerte mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden und das vertikale Geschwindigkeitsprofil direkt vor den Pflanzen stark von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit abweichen kann, ist die Streubreite der C_D -Werte ebenfalls signifikant. Die berechneten C_D -Werte sind nicht die auf die individuelle Anströmgeschwindigkeit bezogene C_D -Werte, sondern C_D -Werte in Abhängigkeit von u_m . Über das individuelle Widerstandsverhalten der Elemente ist somit keine weitere Aussage möglich, da das Geschwindigkeitsprofil unmittelbar vor den Pflanzen unbekannt ist. Die Messungen von A_P und Berechnungen von C_D zeigen jedoch, dass weder A_P noch C_D konstant sind.

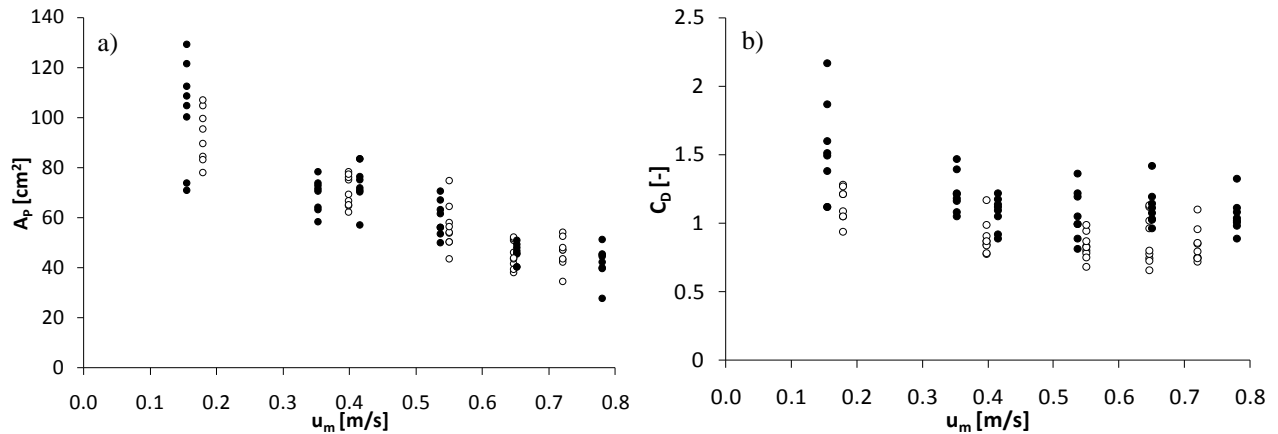


Abb. 5.9 (a) Variabilität der frontal projizierten Fläche A_p und (b) des Widerstandsbeiwertes C_D der künstlichen Pappelzweige in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m der Anordnungen 30L (offene Symbole) und 30S (volle Symbole).

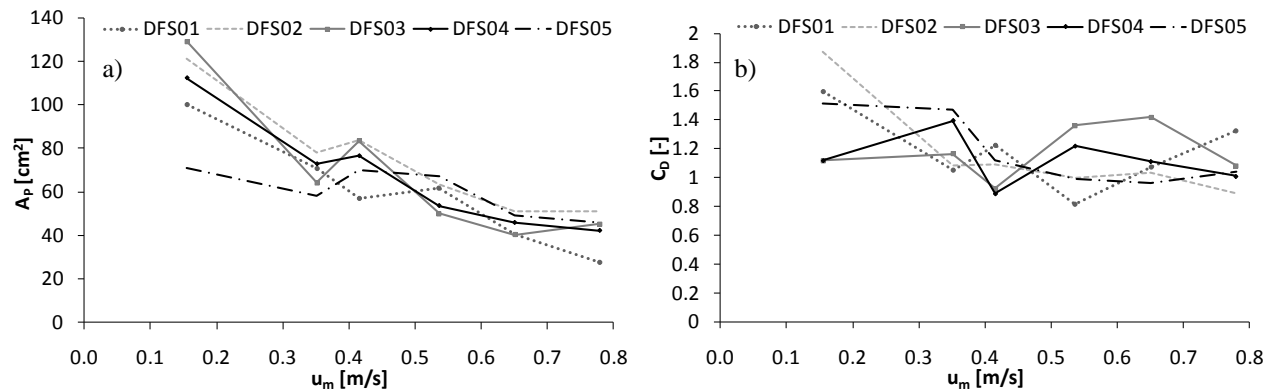


Abb. 5.10 (a) Variabilität der frontal projizierten Fläche A_p und (b) des Widerstandsbeiwertes C_D der künstlichen Pappelzweige bei der Anordnung 30S.

Bei den starren Zylindern ist die frontal projizierte Fläche A_p konstant (aufgrund der konstanten Wassertiefe) und unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Die räumliche Variabilität der Widerstandskräfte wirkt sich somit direkt auf den Widerstandsbeiwert der Elemente aus, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m als Referenzgeschwindigkeit verwendet wird. Die Variabilität der C_D -Werte ist in Abb. 5.11 dargestellt. Aufgrund der geringeren Widerstandskräfte bei gleicher mittlerer Strömungsgeschwindigkeit werden auch hier niedrigere C_D -Werte für die Reihenanzordnung als für die versetzte Anordnung berechnet. Die Streubreite der C_D -Werte ist wie bei den Widerstandskräften und bei den künstlichen Pappelzweigen unabhängig von der Anordnung der Elemente. Die Messungen zeigen, dass die maximale Abweichung der individuellen C_D -Werte vom mittleren Widerstandsbeiwert $C_{D(20S_Zyl)} = 1,07$ zwischen 0,77 und 1,27 liegt und für $C_{D(20L_Zyl)} = 0,86$ zwischen 0,59 und 1,19. Dies entspricht einer relativen Abweichung vom räumlichen Mittelwert von -18% bis +22% für die Reihenanzordnung und -30% bis +28% für die versetzte Anordnung. Diese relativen Abweichungen liegen im Bereich der von PETRYK (1969) ermittelten Schwankungsbreite direkt (anhand von Kraftmessungen) bestimmter Widerstandskoeffizienten am Einzelelement im Bewuchsfeld. Die hier gezeigte Variabilität der C_D -Werte liefert eine Erklärung für die durch PETRYK (1969) ermittelten Abweichung zwischen den Messergebnissen und Berech-

nungsergebnissen mit einem eigens von PETRYK (1969) entwickelten theoretischen Ansatz zur Bestimmung von Widerstandskoeffizienten im Bewuchsfeld.

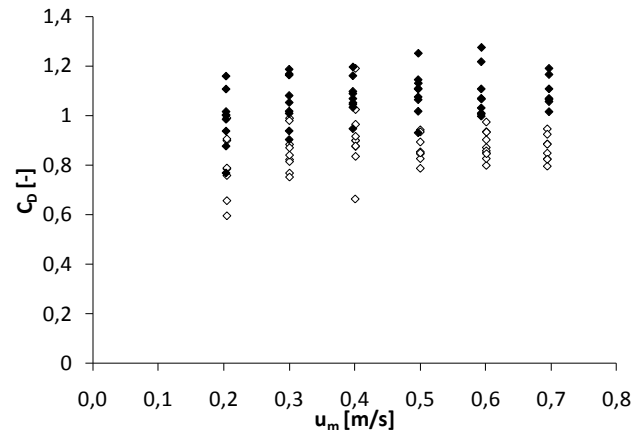


Abb. 5.11 Variabilität der Widerstandsbeiwerte C_D in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Anordnungen 20L_Zyl (offene Rauten) und 20S_Zyl (volle Rauten).

Räumlich gemittelte Werte

Die räumlich gemittelten $\langle A_P \rangle$ und $\langle C_D \rangle$ -Werte wurden durch Mittelwertbildung der A_P und C_D -Werte der individuellen Elemente einer Versuchsreihe berechnet. Die $\langle A_P \rangle$ und $\langle C_D \rangle$ -Werte der Versuchsreihen mit den flexiblen Pappelzweigen sind in Abb. 5.12a und b dargestellt. Abb. 5.12a zeigt, dass $\langle A_P \rangle$ der künstlichen Pappelzweige unabhängig von der Dichte und der Anordnung ist. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Streubreite von $\langle A_P \rangle$ signifikant ist. Dies kann teilweise auf die Bestimmung aus Momentaufnahmen zurückgeführt werden. Weiterhin ist zwischen den $\langle A_P \rangle$ -Werten der einzelnen Pappel und den $\langle A_P \rangle$ -Werten in Bewuchsfeldern kein signifikanter Unterschied festzustellen, da die Ergebnisse des Einzelelementes innerhalb der Streubreite der $\langle A_P \rangle$ -Werte des Bewuchsfeldes liegen. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass $\langle A_P \rangle$ mit steigender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit stark abnimmt, wobei die höchste Reduktion der Fläche bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,4 m/s erfolgt.

Für die Reihenanordnung berechnen sich, resultierend aus den geringeren Widerstandskräften der Reihenanordnung und einer vergleichbaren frontal projizierten Fläche für beide Anordnungen, geringere $\langle C_D \rangle$ -Werte für die Reihenanordnung als für die versetzte Anordnung (Abb. 5.12b). Weiterhin liegt eine hohe Übereinstimmung der Widerstandsbeiwerte des einzelnen Pappelzweiges mit den $\langle C_D \rangle$ -Werten der Reihenanordnung vor. Dies ist, wie bereits in Abschnitt 5.1.1.1. diskutiert, ein auf die Versuchsdurchführung zurückzuführendes Ergebnis. Unterschiedliche Widerstandsbeiwerte zwischen der Reihenanordnung und der versetzten Anordnung sind auf den Einfluss des Strömungsfeldes zurückzuführen. Auch hier ist (wie bei den Widerstandskräften) zu erwarten, dass kein Unterschied zwischen den Anordnungen erkennbar ist, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit durch die Anströmgeschwindigkeit ersetzt wird.

Abb. 5.12b zeigt weiterhin, dass der Widerstandsbeiwert abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist und eine fallende Tendenz mit steigender Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Die Band-

breite der Änderung des Widerstandsbeiwertes ist signifikant und verdeutlicht, dass die Annahme eines konstanten $\langle C_D \rangle$ -Wertes zu signifikanten Fehlern führt. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass der Widerstandsbeiwert einen Formbeiwert darstellt und keine universelle Konstante verkörpert.

Der Vergleich zwischen F_D , A_P und C_D des einzelnen Pappelzweiges mit den Ergebnissen des Bewuchsfeldes zeigen, dass das Widerstandsverhalten des Einzelelementes mit dem räumlich gemittelten Widerstandsverhalten der Elemente im Bewuchsfeld vergleichbar ist.

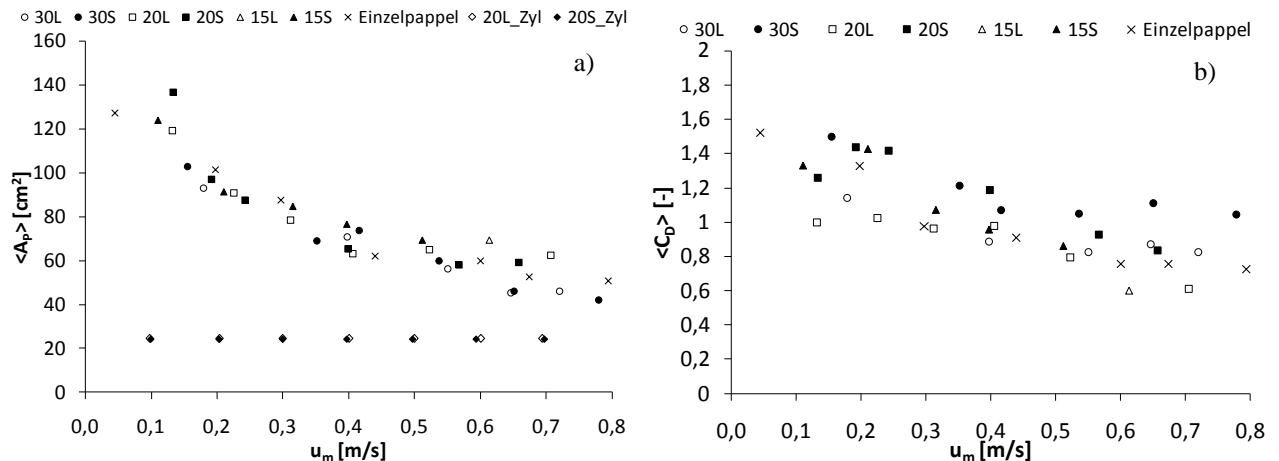


Abb. 5.12 (a) Räumlich gemittelte frontal projizierte Fläche $\langle A_P \rangle$ und (b) Widerstandsbeiwert $\langle C_D \rangle$ der flexiblen Vegetationselemente in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

In Abb. 5.13a und b sind die $\langle C_D \rangle$ -Werte der Versuchsreihen mit den Zylindern im Bewuchsfeld und die C_D -Werte der starren Einzelemente dargestellt. Der $\langle C_D \rangle$ in Abhängigkeit von Re_d nach Gl. (2.3) dargestellt, wobei der Durchmesser d des Zylinders als charakteristisches Längenmaß gewählt wurde.

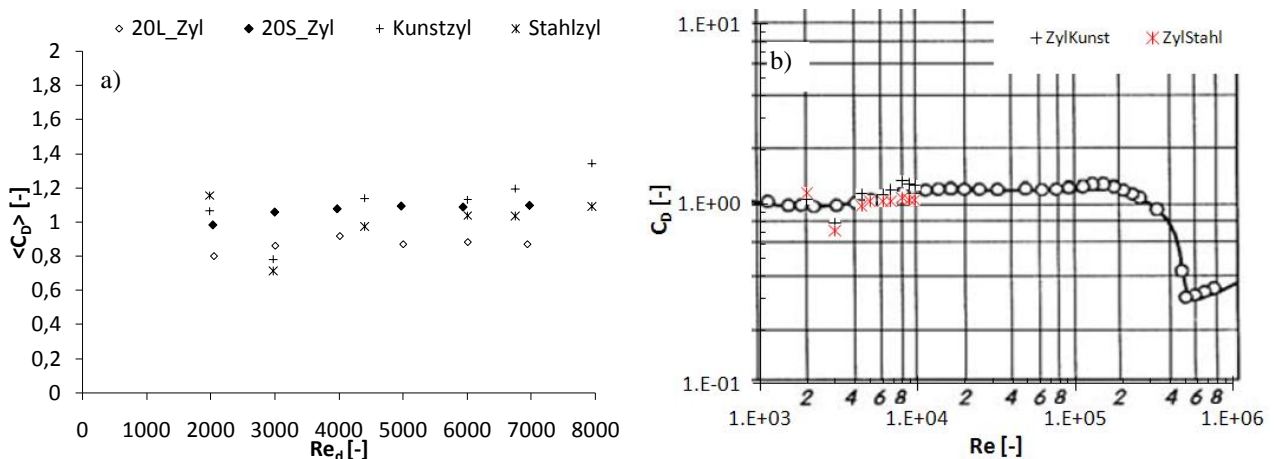


Abb. 5.13 (a) Räumlich gemittelte Widerstandsbeiwerte der Zylinderanordnungen im Bewuchsfeld und der Einzelemente und (b) im Vergleich zu den Messungen von WIESELSBERGER (aus SCHLICHTING & GERSTEN 2006) in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re_d .

Die Abbildung zeigt wie erwartet, höhere $\langle C_D \rangle$ -Werte für die versetzte Anordnung als für die Reihenanordnung. Weiterhin zeigt die Darstellung näherungsweise konstante Widerstandsbeiwerte für beide Anordnungen. Im Reynoldszahlenbereich von $2000 \leq Re_d \leq 7000$ beträgt der Mittelwert

der Widerstandsbeiwerte für die Reihenanordnung $C_{D,20L} = 0,87$ und für die versetzte Anordnung $C_{D,20S} = 1,07$.

Entsprechend der in Abschnitt 2.2.1.1 beschriebenen Vorgehensweise zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes eines umströmten Kreiszylinders inmitten eines Bewuchsfeldes nach dem Verfahren von LINDNER (1982), wurden die Widerstandsbeiwerte für die durchgeführten Versuche anhand der Gleichungen (2.11) bis (2.15) mit einem MATLAB-Programm berechnet (vgl. SCHONEBOOM ET AL. 2010c). Dabei wurde der Einfluss von Schwerewellen in Gl. (2.16) vernachlässigt, da die Zylinder gerade überströmt waren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tab. 5.1 zusammen mit den hydraulischen Verhältnissen und den Versuchsergebnissen dargestellt.

Tab. 5.1 Hydraulische Verhältnisse, gemessene Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ und –beiwerte $C_{Di}^{(a)}$ und berechnete Widerstandsbeiwerte $C_{Di}^{(b)}$ nach dem Verfahren von LINDNER (1982).

	u_m [m/s]	h [m]	S [%]	Re_d [1]	$\langle F_D \rangle$ [N]	$C_{Di}^{(a)}$ [-]	$C_{Di}^{(b)}$ [-]
Reihenanordnung (L)	0,20	0,247	0,06	2043	0,04	0,80	0,72
	0,30	0,251	0,13	3001	0,09	0,86	0,72
	0,40	0,250	0,24	4011	0,18	0,92	0,72
	0,50	0,251	0,36	5002	0,27	0,87	0,72
	0,60	0,251	0,54	6012	0,39	0,88	0,73
	0,69	0,252	0,72	6944	0,51	0,87	0,73
Versetzte Anordnung (S)	0,20	0,246	0,07	2032	0,05	0,98	1,12
	0,30	0,250	0,14	2998	0,12	1,06	1,12
	0,40	0,252	0,26	3973	0,21	1,08	1,12
	0,50	0,251	0,41	4972	0,33	1,09	1,12
	0,59	0,253	0,62	5938	0,47	1,09	1,12
	0,70	0,251	0,92	6975	0,65	1,10	1,12

Der Vergleich zwischen den berechneten C_D -Werten und den gemessenen Werten zeigt, dass die Widerstandskoeffizienten der Reihenanordnung nach dem Verfahren von LINDNER (1982) näherungsweise um 16% unterschätzt und die Koeffizienten der versetzten Anordnung näherungsweise um 5% überschätzt werden. In Anbetracht der zahlreichen Annahmen innerhalb des Verfahrens (vgl. SCHONEBOOM ET AL. 2010c), sind diese Abweichungen als relativ gering einzuschätzen. Damit wird die Anwendbarkeit des Verfahrens nach LINDNER (1982) für die gegebenen Randbedingungen experimentell bestätigt. Es ist anzumerken, dass eine experimentelle Überprüfung des Verfahrens von LINDNER (1982) bislang noch nicht durchgeführt wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1.1).

Weiterhin ist anzumerken, dass LINDNER (1982) mit zunehmender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und abnehmendem Gefälle sinkende Werte für u_{020}/u_0 berechnete (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Da die hier durchgeführten Versuche jedoch bei konstanter Fließtiefe mit $h = 25$ cm durchgeführt

wurden, musste mit steigender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit u_0 die Sohlenneigung S ansteigen. Mit steigendem u_0 sind nach LINDNER (1982) sinkende Werte für u_{020}/u_0 (und damit sinkende C_D -Werte) zu erwarten und für eine steigende Sohlenneigung S steigende Werte für u_{020}/u_0 und damit steigende C_D -Werte. Die Ergebnisse in Tab. 5.1 zeigen hingegen konstante berechnete C_D -Werte für die unterschiedlichen hydraulischen Verhältnisse. Daraus folgt, dass sich die gegensätzlichen Trends gegeneinander aufheben, wenn die Fließtiefe konstant bleibt. Diese Schlussfolgerung wird durch näherungsweise konstante, experimentell bestimmte C_D -Werte bestätigt.

Die Widerstandskoeffizienten können weiterhin nach dem vereinfachten, grafischen Verfahren nach Abb. 2.5 bestimmt werden, wobei angemerkt werden muss, dass die hydraulischen Verhältnisse außerhalb des durch LINDNER (1982) angegebenen Anwendungsbereichs der Abbildung liegen. Für die Datenreihe 20S_Zyl ergibt sich ein Wert $C_{D,20S,Lindner} = 1,05$ und für die Versuchsreihe 20L_Zyl ein Wert $C_{D,20L,Lindner} = 0,90$. Im Vergleich zu den numerisch berechneten Werten liegt in diesem konkreten Fall eine höhere Übereinstimmung zwischen gemessenen und grafisch bestimmten Werten vor als bei den zuvor berechneten. Für Zwecke der Vordimensionierung ist das grafische Verfahren somit anwendbar.

In Abb. 5.13a sind weiterhin die C_D -Werte der Einzelelemente dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass entsprechend der höheren gemessenen Widerstandskräfte des Kunststoffzylinders höhere C_D -Werte als bei dem Stahlzylinder berechnet werden, was auf die strömungsinduzierten Schwingungen zurückgeführt werden kann. Weiterhin liegen die Widerstandsbeiwerte des Stahlzylinders wie erwartet im Bereich $C_D \approx 1,0$ und sind mit den in Abb. 2.1 dargestellten Messungen gut vergleichbar. Entsprechend den Erwartungen liegen die Widerstandsbeiwerte des Stahlzylinders zwischen denen der versetzten Anordnung und der Reihenanordnung.

Letztendlich ist festzuhalten, dass für die gegebenen experimentellen Randbedingungen die Differenz zwischen dem Widerstandskoeffizienten eines isolierten Einzelelementes ($C_D = 1,0$) und dem mittleren Widerstandsbeiwert der Zylinder im Bewuchsfeld, unter Verwendung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, signifikant ist und berücksichtigt werden muss. Dies kann beispielsweise durch das Verfahren von LINDNER (1982) geschehen. Diese Unterschiede verdeutlichen die große Bedeutung der Beeinflussung des Strömungsfeldes durch die Nachlaufströmungen der Vegetationselemente.

5.1.1.3 Biegeverhalten

Der Hebelarm L ist definiert als der Abstand zwischen der resultierenden Widerstandskraft F_D auf das Vegetationselement und der Sohlenoberfläche des Gerinnebodens (vgl. Abb. 3.2). Eine Erhöhung oder Verringerung der Strömungskräfte wirkt sich direkt auf den Hebelarm aus, und kann damit zur Beschreibung des Biegeverhaltens der flexiblen Vegetationselemente herangezogen werden. Es wird dabei angenommen, dass die Kräfteverteilung über die Elementhöhe konstant ist. Dies trifft in guter Näherung für die künstlichen Pappelzweige zu (vgl. Abschnitt 5.3 und 5.4).

In Abb. 5.14a ist der Hebelarm L der flexiblen, voll belaubten Pappelzweige beispielhaft für die Anordnungen 30S und 30L dargestellt. Durch die Variation des Hebelarmes L innerhalb eines Versuches, wird das individuelle Verhalten der identischen Pappelzweige bestätigt. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die Variabilität des Hebelarmes unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und somit unabhängig von der Höhe der angreifenden Kräfte ist. Für alle weiteren Anordnungen sind die Ergebnisse im Anhang in Abb. A 19 dargestellt.

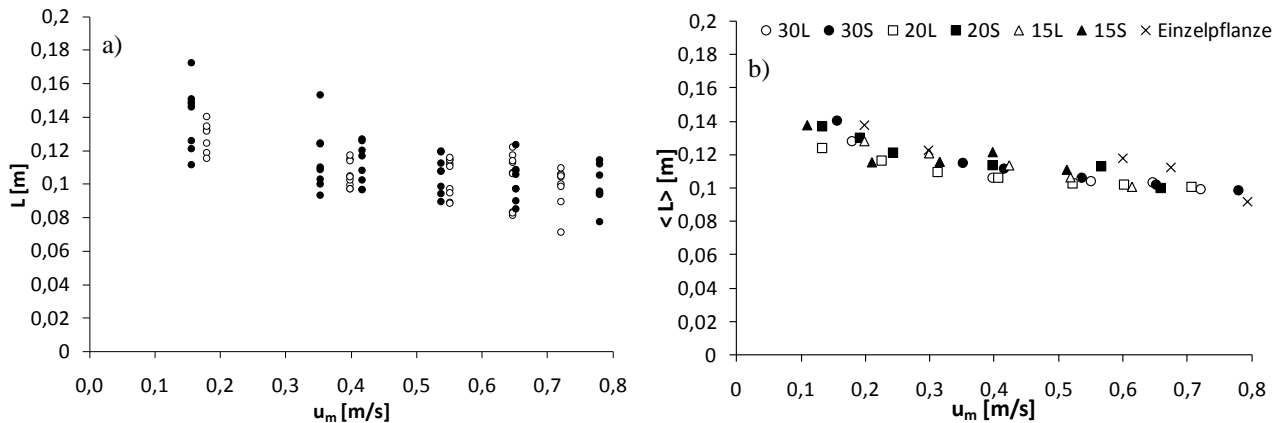


Abb. 5.14 (a) Variation des Hebelarmes L der Anordnungen 30S (geschlossene Symbole) und 30L (offene Symbole) und (b) räumlich gemittelter Hebelarm $\langle L \rangle$ für alle Anordnungen in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

Die Darstellung des räumlich gemittelten Hebelarmes $\langle L \rangle$ in Abb. 5.14b zeigt eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen $\langle L \rangle$ und u_m , wobei $\langle L \rangle$ mit steigender Strömungsgeschwindigkeit von einem Anfangswert $L \approx 14$ cm auf $L \approx 9$ cm sinkt. Die Größe von $\langle L \rangle$ ist unabhängig von der Vegetationsdichte und der -anordnung. Bei einer Verringerung des Hebelarmes um 35 % vom Ausgangswert ist das Biegeverhalten als moderat zu bewerten. Es findet keine vollständige Umlegung der Pflanzen statt, wie sie oftmals in der Natur beobachtet wird (vgl. OPLATKA 1998). Während der Versuchsdurchführung konnte beobachtet werden, dass die Pflanzen nach der Entlastung in ihre Ausgangspositionen zurückkehrten. Zusätzlich zu den Ergebnissen im Bewuchsfeld sind die Ergebnisse des isolierten künstlichen Pappelzweiges in Abb. 5.14b dargestellt. Die Abbildung zeigt eine hohe Übereinstimmung zwischen dem räumlich gemittelten Hebelarm $\langle L \rangle$ im Bewuchsfeld und dem Hebelarm der Einzelpflanze. Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Ergebnissen der angeströmten Fläche A_P , dem Widerstandsbeiwert C_D und der Widerstandskraft F_D . Die Versuche zeigen, dass sich die künstliche Pappel im Bewuchsfeld ähnlich verhält wie das isolierte Einzelement in der ungestörten Strömung.

Aus diesen Ergebnissen wird abschließend gefolgert, dass sich die Vegetationselemente in diesen Versuchsreihen nicht gegenseitig beeinflussen und sich somit das Widerstandsverhalten eines einzelnen künstlichen Pappelzweiges in ungestörter Strömung nicht von dem Widerstandsverhalten von Pappelzweigen in einem Bewuchsfeld mit ausgeprägten Nachlaufströmungen unterscheidet. Weiterhin kann gefolgert werden, dass anhand von Versuchen am Einzelement die Widerstandskräfte, die angeströmte Fläche und die Widerstandsbeiwerte für Bewuchsfelder vorhergesagt werden können, wenn sich die Vegetationselemente nicht gegenseitig beeinflussen. Es bleibt an

dieser Stelle offen und ist in weiteren Versuchsreihen zu untersuchen, welche Auswirkung eine gegenseitige Beeinflussung der Vegetationselemente auf F_D , C_D , A_P und L im Vergleich zum isolierten Einzelelement hat.

5.1.2 Gesamtfleißwiderstand

Der Gesamtfleißwiderstand in Gerinneströmungen mit Vegetation wird neben dem Widerstand der Gerinnesohle durch das Widerstandsverhalten der Vegetationselemente, die Vegetationsdichte und die Vegetationsanordnung bestimmt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Obwohl die Widerstandskräfte der identischen Pappelzweige eine hohe Variabilität aufweisen, unterliegt das räumlich gemittelte Widerstandsverhalten nur geringfügigen Schwankungen (vgl. Abschnitt 5.1.1.1).

In Abb. 5.15a ist die Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass hohe Unterschiede zwischen den Vegetationsdichten und -anordnungen festzustellen sind. Die Gesamtschubspannung der Zylinderanordnungen 20L_Zyl und 20S_Zyl liegt im Bereich der Datenreihen 30S und 30L der künstlichen Pappelzweige. Um den Einfluss von der Vegetationsdichte und der Anordnung zu eliminieren, wurde die Gesamtschubspannung über die Dichte $m = 1/(a_x a_y)$ und einen Anordnungsfaktor P normiert. Der Faktor P wurde durch die Berechnung des Verhältnisses von zwei linearen Regressionsgeraden der Gesamtschubspannung bei Reihenanordnung und versetzter Anordnung ermittelt. Daraus ergibt sich für die Reihenanordnung $P = 1,16$ und für die versetzte Anordnung $P = 1$. Die normierte Gesamtschubspannung ist in Abb. 5.15b dargestellt. In grober Näherung fallen die Daten der Versuchsreihen für die Pflanzen sowie für die Zylinder jeweils auf eine Gerade. Die Abbildung zeigt, dass die Abweichungen zwischen den Versuchsreihen mit den Pappelzweigen bis zu einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit $u_m = 0,3$ m/s sehr gering sind und für $u_m > 0,3$ m/s ansteigen.

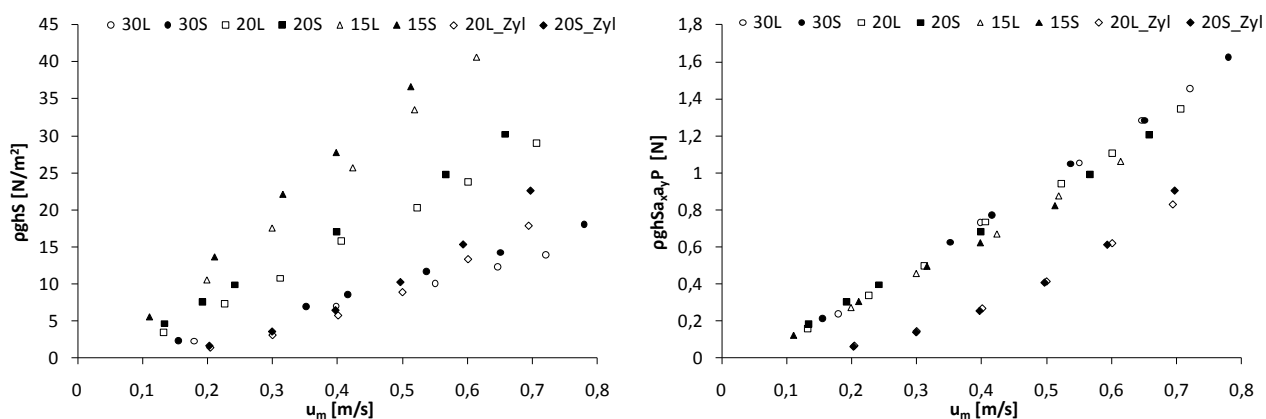


Abb. 5.15 (a) Gesamtschubspannung und (b) über die Vegetationsdichte m und die Anordnung P normierte Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

Abb. 5.15a und b zeigen weiterhin, dass die Gesamtschubspannung und die normierte Gesamtschubspannung der Pappelzweige in guter Näherung linear mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ansteigen. Eine Verlängerung der linearen Beziehung in Richtung Ursprung weist durch einen negativen Schnittpunkt mit der y-Achse darauf hin, dass im Bereich geringer Strömungsgeschwindigkeiten eine nichtlineare Abhängigkeit vorliegen muss. Diese nichtlineare

Beziehung ist auf das Widerstandsverhalten der flexiblen Vegetationselemente bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.1.2 und Kapitel 4).

Die Gesamtschubspannung der Versuchsreihen mit den starren Zylindern 20L_Zyl und 20S_Zyl wurde ebenfalls über den Anordnungsfaktor P normiert. Das Ergebnis dieser Normierung zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung der Messwerte zwischen der Reihenanordnung und der versetzten Anordnung (Abb. 5.15b). Weiterhin zeigen die Ergebnisse der Zylinderanordnungen, dass der funktionale Zusammenhang zwischen Gesamtschubspannung und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit vom Widerstandsverhalten der Vegetationselemente dominiert.

5.1.3 Sohlenwiderstand

Unter Vernachlässigung des Einflusses der Wandrauheit auf den Gesamtwiderstand kann die Sohlenschubspannung unter Anwendung von Gl. (2.7) aus den Versuchsreihen direkt berechnet werden. Die Sohlenschubspannung τ_0' ist in Abb. 5.16a in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für die flexiblen und starren Elemente dargestellt.

Die Abbildung zeigt, obwohl eine gewisse Streuung vorliegt, tendenziell steigende Werte mit steigender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit (Abb. 5.16a) und steigender Gesamtschubspannung (Abb. 5.16b). Dies stimmt mit den Beobachtungen von BROWN ET AL. (2008) überein. Weiterhin ist für Versuchsreihen der gleichen Vegetationsdichte die Sohlenschubspannung für vergleichbare Strömungsgeschwindigkeiten bei der Reihenanordnung größer als bei der versetzten Anordnung. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die berechnete Sohlenschubspannung für die gleiche Anordnung und für vergleichbare Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 5.16a) oder vergleichbarer Gesamtschubspannung (Abb. 5.16b) bei geringerer Vegetationsdichte größer ist.

Während der Verlauf der Datenpunkte der Versuchsreihen mit den künstlichen Pappelzweigen nicht ausnahmslos konsistent ist, zeigen die Sohlenschubspannungen der Datenreihen 20L_Zyl und 20S_Zyl konsistent steigende Werte. Diese Beobachtung ist in Übereinstimmung mit der Feststellung von BROWN ET AL. (2008), die im Windkanal den Einfluss unterschiedlicher räumlicher Anordnungen starrer Rauheitselemente untersuchten. BROWN ET AL. (2008) stellten fest, dass die Widerstandskräfte der Rauheitselemente und die Sohlenschubspannung mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ansteigen und die Beziehungen näherungsweise durch eine quadratische Gleichung beschrieben werden können. Die von BROWN ET AL. (2008) untersuchten Vegetationsdichten liegen mit 12,8 Elemente/m², 21,9, 37,5 und 69,9 Elemente/m² im Bereich der Vegetationsdichten dieser Untersuchungen.

Die Streubreite der berechneten Sohlenschubspannungen der Versuchsreihen mit den Pappelzweigen kann u.a. auf Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Wasserspiegellageneigung S , und der Fließtiefe h zurückgeführt werden. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten konnte während der Versuchsdurchführung infolge der sehr geringen Überdeckung der Vegetationselemente Wellenbildung unmittelbar in der Nähe der Vegetationselemente beobachtet werden. Obwohl die Wellenbildung nicht näher quantifiziert werden konnte, muss bei der Interpretation berücksichtigt werden, dass diese die Genauigkeit der Bestimmung von S und h beeinflussen kann.

Obwohl die berechneten Sohlenschubspannungen durch eine hohe Streubreite gekennzeichnet sind, bestätigen die Messungen die Anwendbarkeit der gewählten Vorgehensweise zur Bestimmung der Sohlenschubspannungen, da in keinem Fall widersprüchliche Sohlenschubspannungswerte ermittelt worden sind, die sich bspw. im negativen Wertebereich befinden. In den Versuchsreihen mit den starren Zylindern trat Wellenbildung nur sehr geringfügig auf. Entsprechend liegen Werte mit einer besseren Übereinstimmung für die berechneten Sohlenschubspannungen vor.

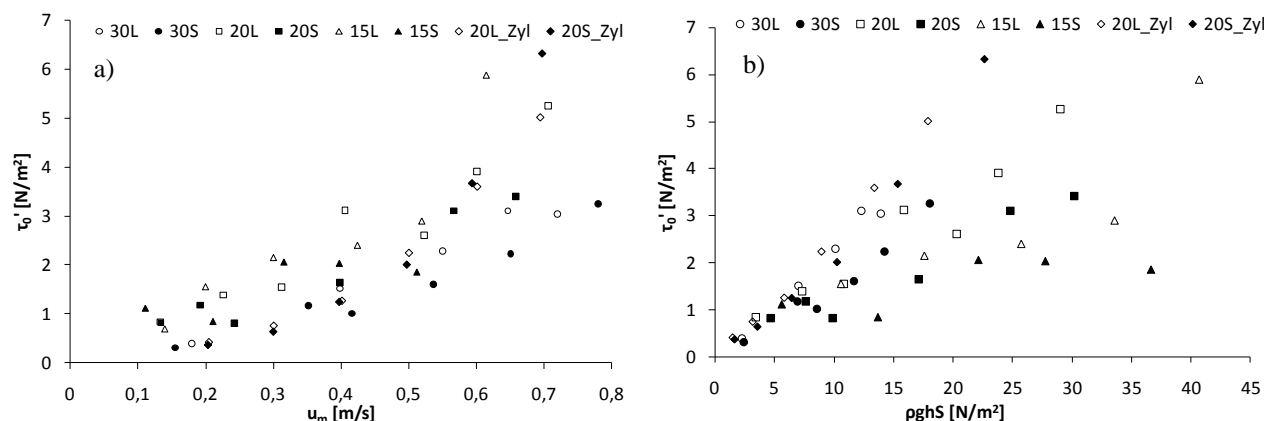


Abb. 5.16 Sohlenschubspannung τ_0' in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (a) und in Abhängigkeit der Gesamtschubspannung (b).

In Abb. 5.17 ist der prozentuale Anteil der Sohlenschubspannung τ_0' an der Gesamtschubspannung $\rho g h S$ dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass der Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung bei den Zylinderanordnungen am größten ist. Der prozentuale Anteil der Versuchsreihe 20L_Zyl liegt zwischen 21,8 % und 28 % und der Anteil der Versuchsreihe 20S_Zyl befindet sich zwischen 18,1 % und 28 %. Näherungsweise ist ein konstanter Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung festzustellen. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der Beobachtung von CRAWLEY & NICKLING (2003), die feststellten, dass der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die Anteile der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung für die künstlichen Pappelzweigen zwischen 5 % und 25,3 % liegen. Obwohl die Anteile der Anordnungen 20L und 20S bei ca. 0,4 m/s zu einem Minimum tendieren, weisen alle weiteren Versuchsreihen mit den künstlichen Pappelzweigen nicht auf dieses Verhalten hin. Die Ergebnisse der Versuchsreihen 30L, 30S, 15L und 15S weisen eher auf konstante Anteile der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung hin. Eine eindeutige Staffelung in Abhängigkeit der Dichte $30 > 20 > 15$ liegt nicht vor. Weiterhin zeigen die berechneten Werte der Pappelzweige durchgehend höhere Anteile der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung bei der Reihenanordnung als bei versetzter Anordnung. Ein höherer Anteil bei der Reihenanordnung lässt sich direkt aus den Verhältnissen zwischen den Regressionsgeraden der Gesamtschubspannung (Faktor 1,16) und des Vegetationswiderstandes (Faktor 1,22) bei versetzter Anordnung ablesen. Im Gegensatz zu der hier gezeigten deutlichen Abhängigkeit der Sohlenschubspannung von der Anordnung, folgerten BROWN ET AL. (2008) hingegen aus ihren Versuchsergebnissen,

dass die Anordnung nur einen geringen Einfluss auf den Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand hat.

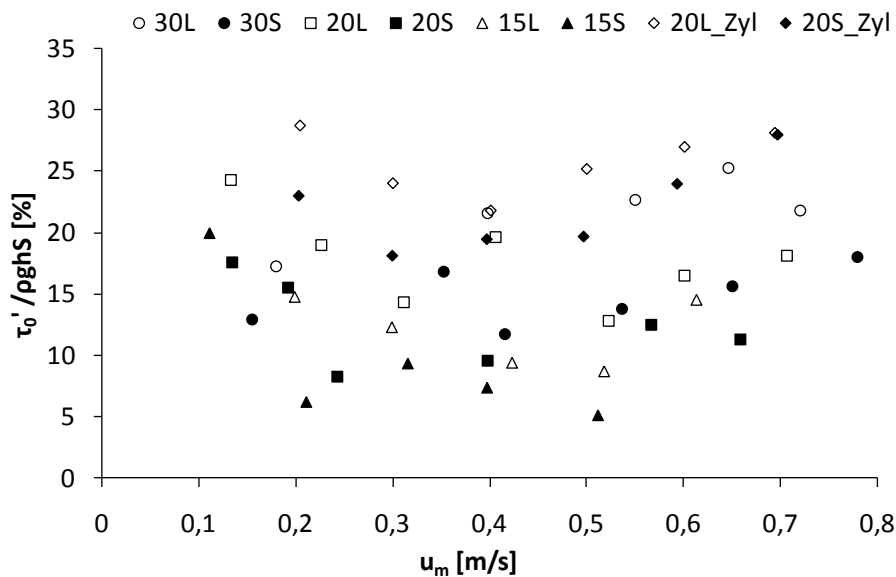


Abb. 5.17 Anteil der Sohlenschubspannung τ_0' an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

Die Ergebnisse in Abb. 5.17 weisen darauf hin, dass die Vernachlässigung des Sohlenwiderstandes in einem Bewuchsfeld zu einer signifikanten Unterschätzung des Gesamtwiderstandes führen kann. Dies bestätigt die Ergebnisse von RIGHETTI (2008), der einen bis zu 45 prozentigen Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand ermittelte. Es ist jedoch anzumerken, dass in den Untersuchungen von RIGHETTI (2008) die Widerstandskraft auf drei Weidenbäume innerhalb eines Bewuchsfeldes mit natürlichen Pflanzen gemessen wurde und keine Angabe über die Vegetationsparameter erfolgte. Diesbezüglich muss die Genauigkeit der Höhe des Anteils der Sohlenschubspannung, basierend auf den hier gezeigten Ergebnissen der räumlichen Variabilität der Widerstandskräfte, in Frage gestellt werden. Nichtsdestotrotz wurde festgestellt, dass sich die Höhe des Sohlenwiderstandes in der gleichen Größenordnung wie der Vegetationswiderstand befinden kann, was durch die hier gezeigten Messungen bestätigt werden kann.

Folgerungen zur Schubspannungsaufteilung

Übereinstimmend mit den Ergebnissen von CRAWLEY & NICKLING (2003) wurde näherungsweise ein konstanter und von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängiger Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand für die starren Zylinder ermittelt. Übereinstimmend mit den Ergebnissen von BROWN ET AL. (2008) wurden ansteigende Werte des Sohlenwiderstandes mit steigendem Gesamtwiderstand festgestellt.

Übereinstimmend mit den Ergebnissen von BROWN ET AL. (2008) für starre Vegetationselemente wurden hier mit den flexiblen Vegetationselementen für steigende Strömungsgeschwindigkeiten steigende Werte der Sohlenschubspannung ermittelt. Weiterhin wurde festgestellt, dass die über die

Anordnung und die Vegetationsdichte normierten Werte der Gesamtschubspannungen näherungsweise auf eine gemeinsame Linie fallen.

Unter Berücksichtigung der aus Messungenauigkeiten resultierenden erhöhten Streubreite berechneter Sohlenschubspannungen der flexiblen Vegetationselemente wird gefolgert, dass der für starre Zylinder gemessene konstante Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in guter Näherung auch für die flexiblen Elemente zutrifft. Das bedeutet, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist der Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung konstant. Für die Reihenanordnung ist der Anteil größer als bei versetzter Anordnung.

5.2 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der Sohlenrauheit

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Höhe des Sohlenwiderstandes und den Gesamtwiderstand soll anhand eines Vergleichs von Versuchsreihen mit zwei unterschiedlichen Sohlenrauheiten „rau“ und „glatt“ aufgezeigt werden. Dabei wurde die hier als „raue Oberfläche“ bezeichnete Sohlenrauheit mit einer Gummimatte realisiert auf deren Oberfläche pyramidenförmige Rauheitselemente mit einer Höhe von 3 mm angebracht sind (vgl. Abb. A 10). Die bislang diskutierten Versuche der Versuchsreihen 30L, 30S, 20L, 20S, 15L, 15S, 20L_Zyl und 20S_Zyl wurden mit der rauen Sohlenoberfläche durchgeführt. Mit den voll belaubten künstlichen Pappelzweigen wurden bei einer Vegetationsdichte Vergleichsmessungen durchgeführt, wobei der Abstand zwischen den Vegetationselemente $a_x = a_y = 20$ cm betrug und die Reihenanordnung L sowie die versetzte Anordnung S untersucht wurde. Die hier als „glatte Oberfläche“ bezeichnete Sohlenrauheit besteht ebenfalls aus einer Gummimatte jedoch ohne Rauheitselemente (vgl. Abb. A 10). Daraus ergeben sich zwei neue Versuchsreihen 20L_glatt und 20S_glatt, die im Folgenden im direkten Vergleich zu den äquivalenten Messungen 20S und 20L mit rauer Sohlenoberfläche diskutiert werden.

In Abb. 5.18a ist die Gesamtschubspannung ρghS in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Gesamtschubspannung ρghS bei glatter Sohlenoberfläche konsistent niedriger ist als bei rauer Sohlenoberfläche, wobei der Unterschied mit steigender Strömungsgeschwindigkeit größer wird. Die räumlich gemittelten Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ in Abb. 5.18b weisen hingegen nahezu unveränderte Werte auf. Die Abweichungen zwischen den Versuchsreihen bei glatter und rauer Sohle sind gering und weisen nicht auf eine Systematik hin.

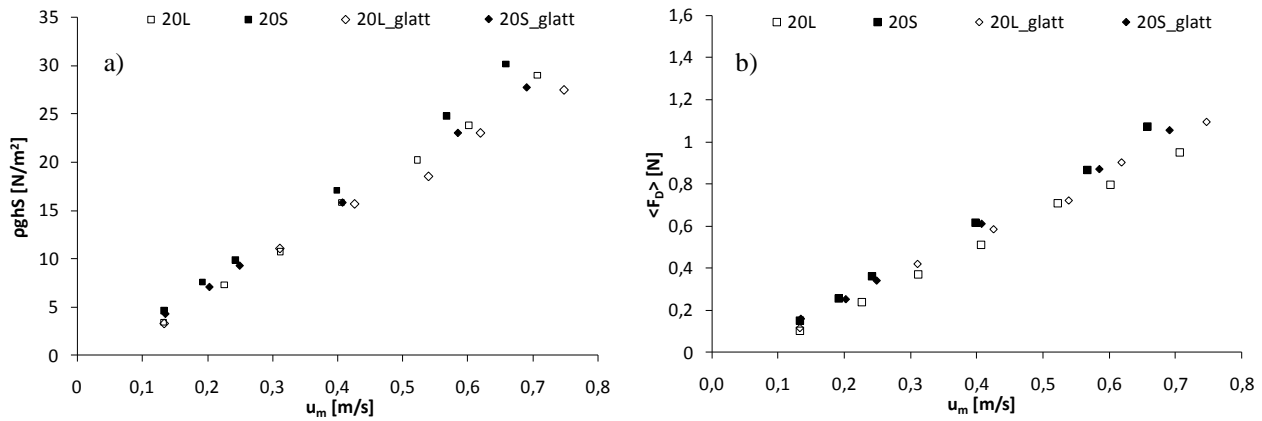


Abb. 5.18 Gesamtschubspannung $\rho g h S$ (a) und räumlich gemittelte Vegetationswiderstandskraft $\langle F_D \rangle$ (b) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

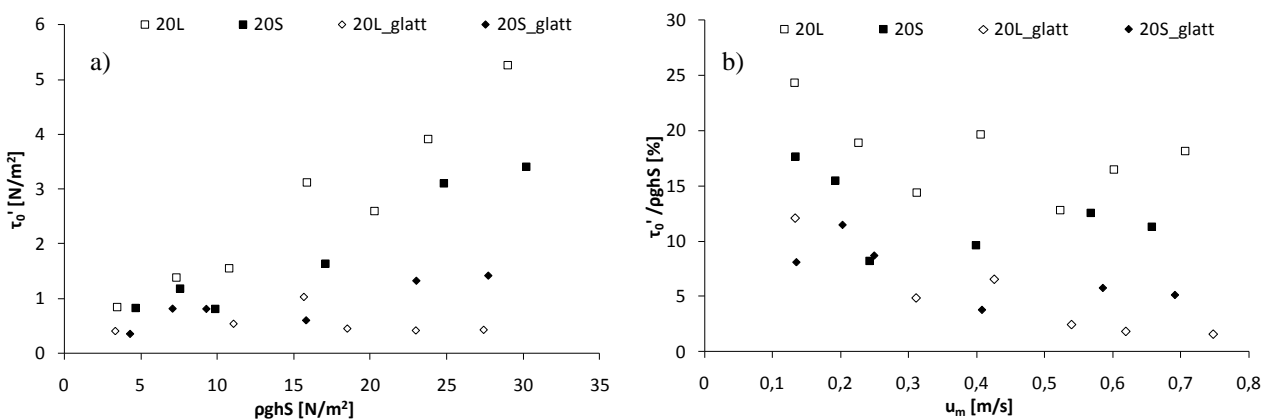


Abb. 5.19 Sohlenschubspannung τ_0' in Abhängigkeit der Gesamtschubspannung (a) und Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m (b). Vergleich zwischen rauher und glatter Sohlenoberfläche.

Resultierend aus den Ergebnissen zum Gesamt- und Vegetationswiderstand ist die berechnete Sohlenschubspannung τ_0' in Abb. 5.19a bei der glatten Sohlenoberfläche geringer als bei der rauhen Sohlenoberfläche. Im Unterschied zu der rauhen Sohle, bei welcher ein deutlicher Anstieg von τ_0' in Abhängigkeit der Gesamtschubspannung zu verzeichnen ist, ist der Anstieg der Sohlenschubspannung bei der glatten Sohle gering, bzw. tendiert zu einem konstanten Wert. Weiterhin sind im Gegensatz zu den Versuchsreihen bei rauher Sohle die berechneten Sohlenschubspannungen für die glatten Oberfläche bei der Reihenanordnung (L) größer als bei versetzter Anordnung (S). Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Messungenauigkeiten sind die Unterschiede jedoch als gering zu bewerten.

Der prozentuale Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung ist in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Abb. 5.19b dargestellt. Bei der Reihenanordnung liegt der Anteil zwischen 1,5 % und 12 % und bei versetzter Anordnung zwischen 3,8 % und 11 %. Unabhängig von der Anordnung ist der Anteil von τ_0' an der Gesamtschubspannung bei der glatten Sohle signifikant geringer als bei der rauhen Sohle.

Die Messungen zeigen, dass der Einfluss der Oberflächenrauheit der Sohle auf die berechnete Sohlenschubspannung quantifiziert werden kann. Zwischen rauher und glatter Sohle wurde ein

eindeutiger Unterschied in der Höhe der berechneten Sohlenschubspannung und im Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung festgestellt. Beim Vegetationswiderstand wurden hingegen keine systematischen Unterschiede zwischen den Messungen mit unterschiedlichen Sohlenoberflächen festgestellt.

5.3 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H

Mit den künstlichen Pappelzweigen wurde im Bewuchsfeld eine Versuchsreihe bei konstanter Neigung, näherungsweise konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und variabler Fließtiefe durchgeführt, um den Einfluss der relativen Fließtiefe h/H auf den Vegetationswiderstand und die Sohlenschubspannung im Bewuchsfeld zu untersuchen. Die Versuchsreihe „15L_varh“ wurde bei einer Sohlenneigung $S = 0,75 \%$, der höchsten Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 15\text{cm}$) und Reihenanzordnung durchgeführt. Die Fließtiefe h wurde in vier Schritten variiert ($h = 5\text{ cm}$, 12 cm , 18 cm und 25 cm), wobei analog zu den zuvor diskutierten Versuchsreihen Normalabflussverhältnisse hergestellt wurden.

In Abb. 5.20a ist zunächst die Fließtiefe h in Abhängigkeit von u_m dargestellt. Die Abbildung zeigt für die Versuchsreihe „15L_varh“, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit steigender Fließtiefe näherungsweise konstant bleibt. Lediglich bei der Fließtiefe $h = 5\text{ cm}$ ist die Strömungsgeschwindigkeit geringfügig höher. Dies weist darauf hin, dass der Vegetationswiderstand, und damit die Blattfläche, näherungsweise konstant über die vertikale Achse der Pflanzen verteilt ist. Im direkten Vergleich zu Versuchsreihe 15L_varh ist die Versuchsreihe 15L dargestellt. In der Versuchsreihe 15L wurde die Strömungsgeschwindigkeit bei gerade überströmten Vegetationselementen variiert. Die Abbildung verdeutlicht den unterschiedlichen Versuchsablauf der Versuchsreihen 15L und 15L_varh.

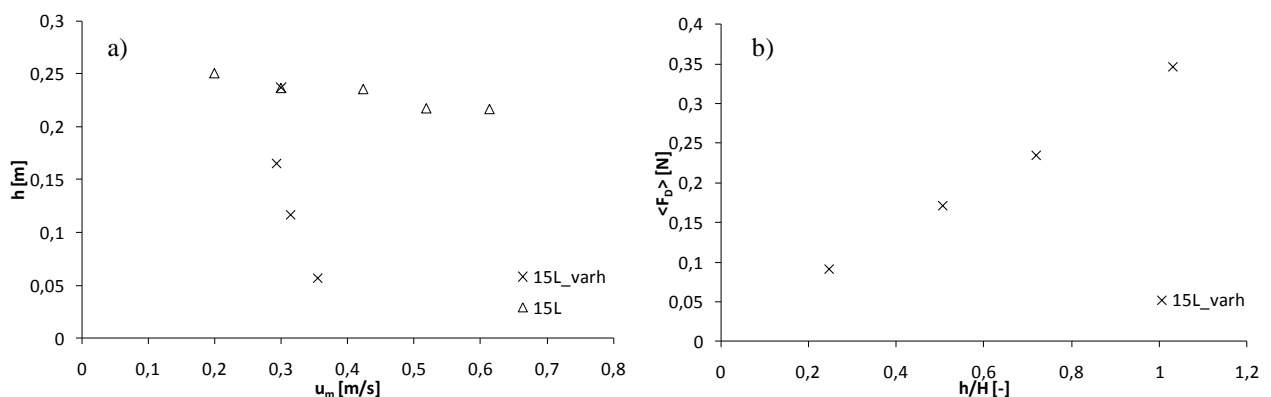


Abb. 5.20 (a) Fließtiefe h in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m und (b) die Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H für die Versuchsreihe 15L_varh bei konstanter Sohlenneigung $S = 0,75 \%$

Die ermittelten Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ sind in Abb. 5.20b in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H dargestellt. Diese deuten auf einen linearen Anstieg von $\langle F_D \rangle$ mit steigender relativer Fließtiefe.

fe h/H hin. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Versuchsreihe geringfügig variiert, was zu Abweichungen vom zuvor beschriebenen linearen Verhältnis führt. Vergleichbare Ergebnisse erzielten KOUWEN & FATHI-MAGHADAM (1997) mit Kiefern- und Zedernästen.

In Abb. 5.21 sind die Versuchsergebnisse der Datenreihe 15L_varh im direkten Vergleich zu den Ergebnissen von JÄRVELÄ (2006) dargestellt. JÄRVELÄ (2006) führte seine Versuche mit belaubten Weidenzweigen und einer versetzten Anordnung sowie Abständen $a_x/a_y = 10/10$ cm in einer 30 cm breiten Versuchsrinne durch. Die gemittelte Blattfläche der natürlichen Weidenzweige betrug 222 cm^2 . Der Blattflächenindex $\text{LAI} = 1,85$ war etwas höher als in den hier vorgestellten Versuchen ($\text{LAI} = 1,75$). Neben der relativen Fließtiefe h/H variierte JÄRVELÄ (2006) zudem die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. In Abb. 5.21 ist der über den Blattflächenindex LAI normierte Darcy-Weißbach Widerstandsbeiwert f'' in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H dargestellt, wobei für H die ungeneigte Pflanzenhöhe angenommen wurde. Der Blattflächenindex LAI berücksichtigt den Einfluss der Vegetationsdichte und der mittleren Blattfläche je Vegetationselement. Die Abbildung zeigt für die Datenreihen „Järvelä (2006) 10cm/s“ und „15L_varh“, einen näherungsweise linearen Anstieg mit der relativen Fließtiefe. Bei den beiden weiteren Datenreihen von JÄRVELÄ (2006), für 30 und 50 cm/s, ist ein Abfall bei gerade überströmten Verhältnissen $h/H \approx 1$ zu beobachten. Dieser Abfall ist vermutlich auf die Biegung der Weidenäste zurückzuführen, was eine teilweise Überströmung der Pflanzen zur Folge hat. Durch die Überströmung verringert sich der Gesamtfließwiderstand signifikant, da oberhalb der Vegetation ein sehr viel geringerer Strömungswiderstand zu verzeichnen ist als innerhalb der Vegetation.

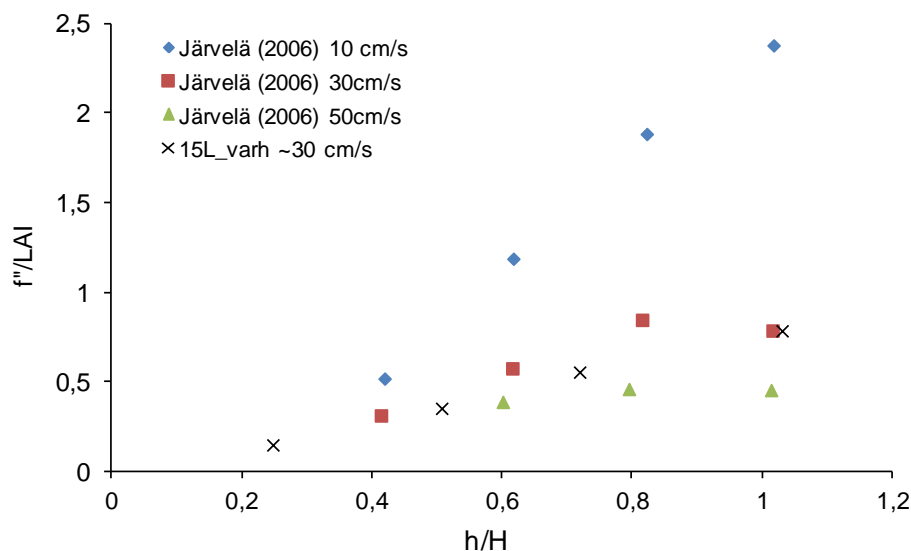


Abb. 5.21 Darcy-Weisbach f'' normiert über LAI in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H .

Die Ergebnisse der Versuchsreihe „15L_varh“ mit den künstlichen Pappelzweigen zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen von JÄRVELÄ (2006), dass sich die normierten Widerstandsbeiwerte f''/LAI bei vergleichbaren Strömungsgeschwindigkeiten deutlich voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede sind auf artspezifische Vegetationsparameter zurückzuführen, für die, wie der Stand

der Forschung (vgl. Abschnitt 2.1) gezeigt hat, noch keine einheitlichen und universellen Parametrisierungsansätze existieren.

In Abb. 5.22a ist der Verlauf der Sohlenschubspannung τ_0' in Abhängigkeit von h/H dargestellt. Die Abbildung zeigt steigende Werte der Sohlenschubspannung mit steigender relativer Fließtiefe. Weiterhin ist in Abb. 5.22b der Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe dargestellt. Mit Ausnahme des Messwertes bei der geringsten relativen Fließtiefe weist die Versuchsreihe tendenziell auf einen konstanten Anteil der Sohlenschubspannung am Gesamtwiderstand hin, wobei zu beachten ist, dass auf Grundlage einer einzelnen Versuchsreihe keine allgemeine Aussage über den Verlauf getroffen werden kann.

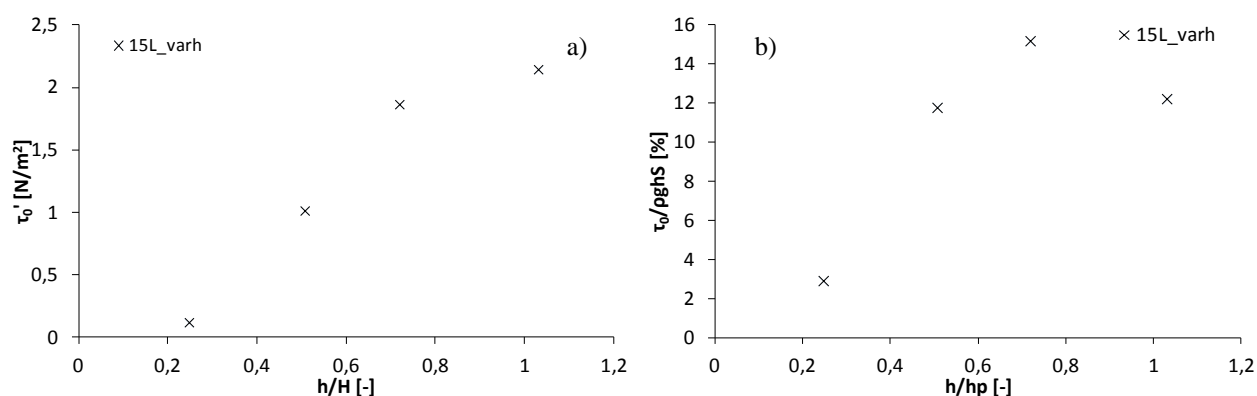


Abb. 5.22 (a) Sohlenschubspannung τ_0' und (b) Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der relativen Fließtiefe h/H .

Im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen beobachteten FENZL & DAVIS (1964) in einem Bewuchsfeld, bestehend aus einer Luzernenart, ein sinkendes Verhältnis der Sohlenschubspannung zur Gesamtschubspannung mit steigender Fließtiefe. FISCHENICH (1996) folgerte daraus, dass die Sohleneigenschaften innerhalb eines Vegetationsfeldes nur bei Strömungen mit sehr geringen Fließtiefen von Bedeutung sind. Diese Schlussfolgerung kann durch die Ergebnisse dieser Versuchsreihe nicht bestätigt werden.

5.4 Vegetations- und Sohlenwiderstand in Abhängigkeit der vertikalen Blattflächenverteilung

FISCHENICH (1996) und FREEMAN ET AL. (2000), aber auch BÖLSCHER ET AL. (2005) merkten an, dass die Pflanzenstruktur und die Blattflächenverteilung einen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung haben können. Die Autoren beobachteten, dass bei Büschen und Bäumen, deren angeströmte Fläche nicht gleichmäßig über die Höhe verteilt ist, das Strömungsfeld stark beeinflusst wird (vgl. Abb. 2.4). Sind bspw. in Bodennähe keine oder wenige Äste oder Laub vorhanden, wird ein signifikanter Anteil der Strömung in diesen offenen Bereichen abgeführt, was zu hohen sohlennahen Strömungsgeschwindigkeiten und einer Erhöhung der Sohlenschubspannung führen kann. Die Zusammenhänge wurden bislang jedoch nur qualitativ beschrieben. Untersuchungen zur Quantifizierung der Abhängigkeit zwischen der vertikalen Verteilung der angeströmten Fläche und der Sohlenschubspannung im Bewuchsfeld wurden bis heute noch nicht durchgeführt.

Zur Untersuchung des Einflusses der vertikalen Verteilung der angeströmten Fläche auf den Sohlenwiderstand wurden mit den flexiblen Pappelzweigen Versuchsreihen bei der mittleren Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 20 \text{ cm}$) und versetzter Anordnung durchgeführt. Die vertikale Verteilung der angeströmten Fläche wurde variiert, indem die Blätter von den Befestigungsstellen entfernt wurden. An den vier Befestigungsstellen des Stammes waren jeweils drei Blätter befestigt. Die Benennung der Versuchsreihen erfolgte anhand der Bezeichnung der vier Befestigungsstellen (von oben nach unten mit den Nummern 1, 2, 3, 4, vgl. Abschnitt 4.2.1), wobei die Befestigungsstellen an denen keine Blätter befestigt waren, mit einem X gekennzeichnet sind. Daraus ergeben sich folgende Versuchsreihenbezeichnungen mit der Angabe der kumulativen Blattfläche A_{Σ} : 20S = 393,7 cm² (voll belaubt), 20S_123X = 262,7 cm², 20S_12XX = 152,0 cm², 20S_1XXX = 85,5 cm² und 20S_12X4 = 283,0 cm². Bei der Datenreihe 20S_123X sind bspw. an den drei obersten Befestigungsstellen jeweils drei Blätter befestigt und nur an der untersten Befestigungsstelle wurden die Blätter entfernt. Somit ist im sohlennahen Bereich nur ein sehr geringer Vegetationswiderstand vorhanden und es wird erwartet, dass dies zu einer Erhöhung der Sohlenschubspannungen führt. In Abb. 5.23 sind Ansichten der Vegetationselemente bei allen Versuchsreihen mit entsprechender Kennzeichnung der Versuchsreihenbezeichnung dargestellt.

Zur Visualisierung der Auswirkungen der Variation der vertikalen Blattflächenverteilung auf das Strömungsfeld wurden die Strömungsgeschwindigkeiten im Bewuchsfeld mit einem Akustik-Doppler-Velocimeter (ADV, vgl. Abschnitt 3.2) für ausgewählte Versuchsreihen gemessen. Dazu wurden 23 vertikale Geschwindigkeitsprofile aufgenommen, wobei der vertikale Abstand zwischen zwei Profilpunkten 1 cm betrug. Die vertikalen Geschwindigkeitsprofile erstreckten sich über die ganze Fließtiefe mit Ausnahme der obersten 5 cm, die nicht mit dem ADV erfasst werden konnten. Die 23 vertikalen Profile wurden in einem 20x20 cm großen Feld aufgenommen. Die Positionen der vertikalen Geschwindigkeitsprofile befanden sich in einem regelmäßigen Abstand zueinander und wurden innerhalb des freien Bereiches, der nicht durch die Vegetationselemente verdeckt wurde, gleichmäßig verteilt.

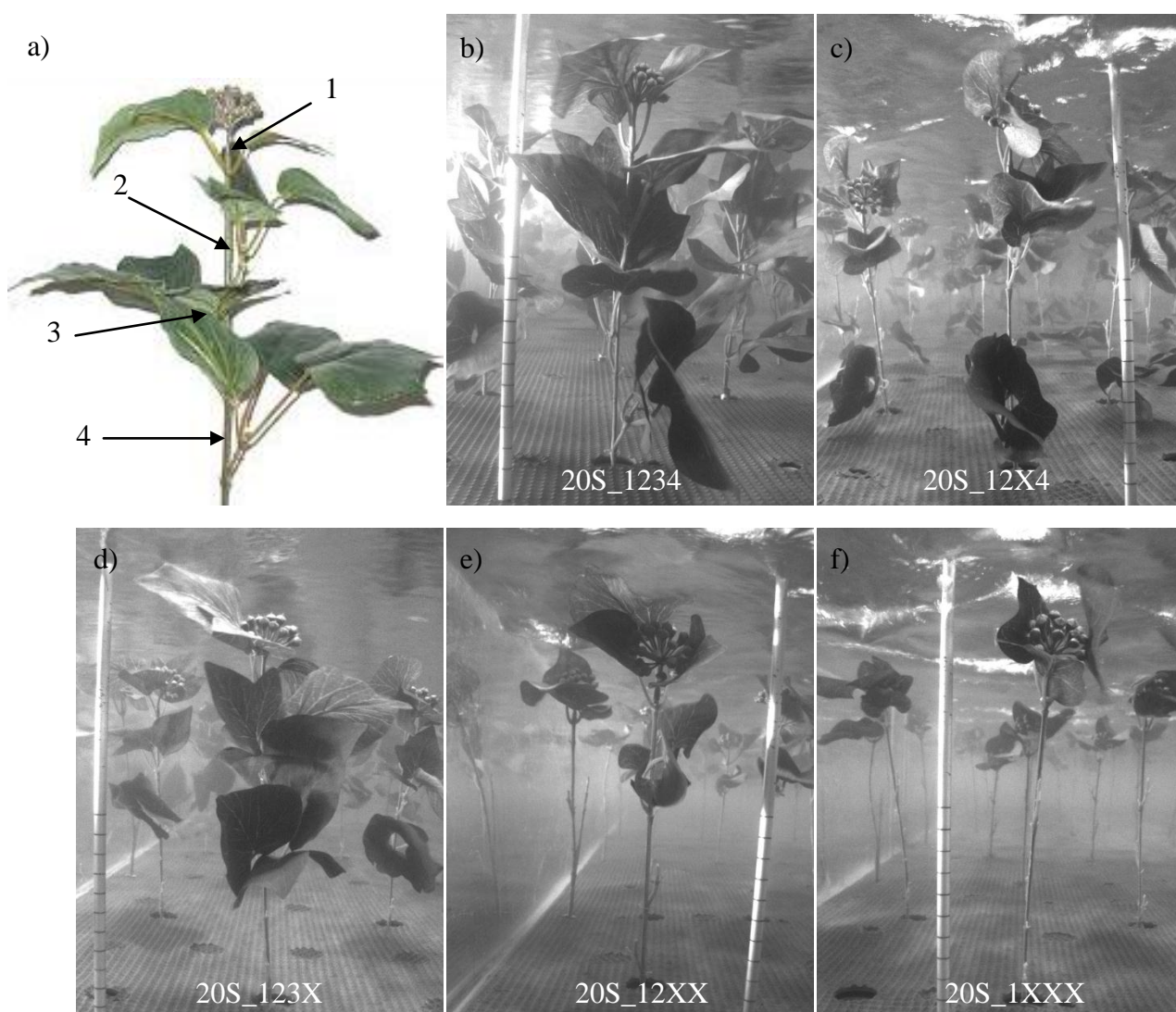


Abb. 5.23 Ansichten der Vegetationselemente in den Versuchsreihen mit variabler vertikaler Blattflächenverteilung. Ansicht entgegen der Strömungsrichtung in (a) ohne Strömungseinfluss und in (b-f) unter Strömungseinfluss im geneigten Zustand. Die Fotos (b-f) wurden während der Experimente mit der Unterwasserkamera aufgenommen.

In Abb. 5.24a ist zunächst die räumlich gemittelte Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m dargestellt. Wie erwartet sind die Widerstandskräfte der voll belaubten Pappelzweige höher als die der teilbelaubten Pappelzweige für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten. Weiterhin weisen die Pappelzweige mit der geringsten Blattfläche die geringsten Widerstandskräfte bei vergleichbaren mittleren Strömungsgeschwindigkeiten auf. In Abb. 5.24b sind die über die einseitige Blattfläche normierten Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m dargestellt. Mit Ausnahme der Datenreihe 20S_1XXX liegt eine hohe Übereinstimmung zwischen den Datenreihen mit Teil- und Vollbelaubung vor. Die höheren Abweichungen der Datenreihe 20S_1XXX resultieren aus der sich in unmittelbarer Nähe der Blätter befindlichen Blüte des Pappelzweiges, welche die stromlinienförmige Verformung der Blätter behindert (vgl. Abb. 5.23f). Diese Behinderung durch die Blüte führt zu höheren auf die Blattfläche bezogenen Widerstandskräften aufgrund einer höheren angeströmten über die Blattflä-

che normierten Fläche (vgl. Abb. 5.25b) im Vergleich zu den Versuchsreihen in denen der überwiegende Teil der Blätter frei beweglich ist. Aus der behinderten Verformung der Blätter resultiert weiterhin eine größere Abweichung vom linearen funktionalen Zusammenhang zwischen normierter Widerstandskraft und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit als bei den anderen Versuchsreihen (Abb. 5.24b). Alle weiteren Versuchsreihen (außer 20S_1XXX) weisen unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung eine näherungsweise lineare Abhängigkeit der normierten Widerstandskraft von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit auf.

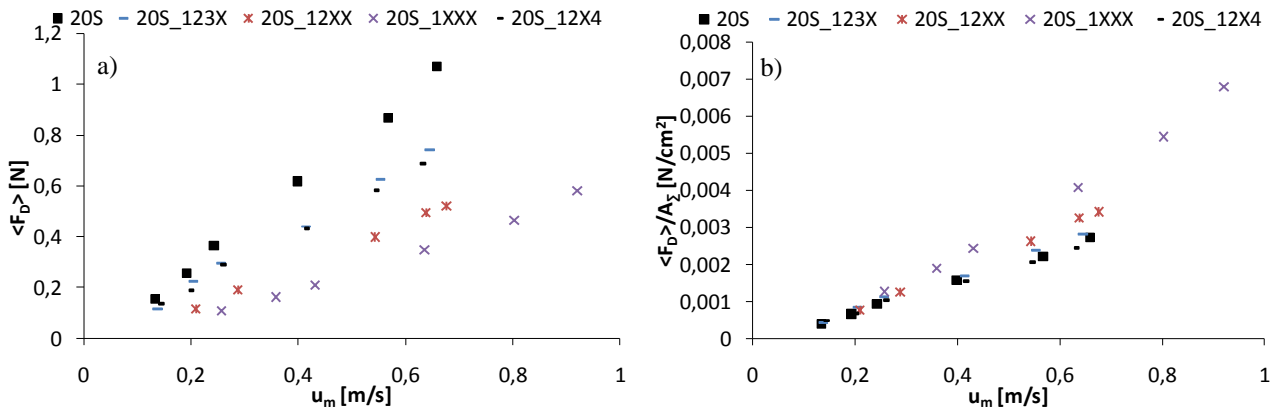


Abb. 5.24 (a) Widerstandskraft $\langle F_D \rangle$ und (b) normierte Widerstandskraft in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der vertikalen Blattflächenverteilung.

In Abb. 5.25a ist die angeströmte Fläche in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Versuchsreihen dargestellt. Wie erwartet reduziert sich die angeströmte Fläche infolge des flexiblen Verhaltens unabhängig von der Blattflächenverteilung. Es wird jedoch deutlich, dass sich die angeströmte Fläche der Versuchsreihe 20S_1XXX weniger stark verringert als in den anderen Versuchsreihen mit einer größeren Anzahl von Blättern. Abb. 5.25b zeigt, dass die über die Blattfläche normierte angeströmte Fläche bei der Datenreihe 20S_1XXX die größten Werte aufweist, während die Datenreihe 20S die kleinsten Werte aufweist.

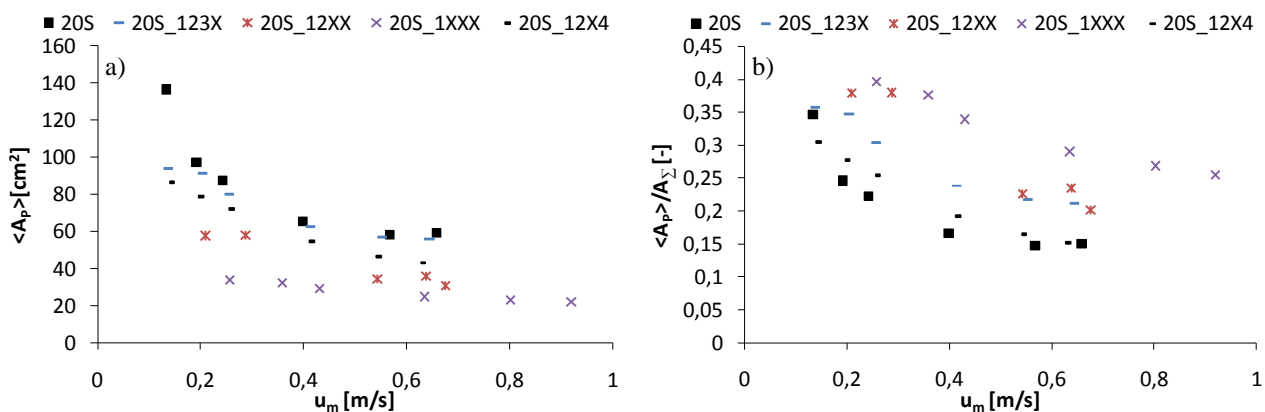


Abb. 5.25 Frontal projizierte Fläche $\langle A_p \rangle$ (a) und über die Blattfläche normierte frontal projizierte Fläche (b) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

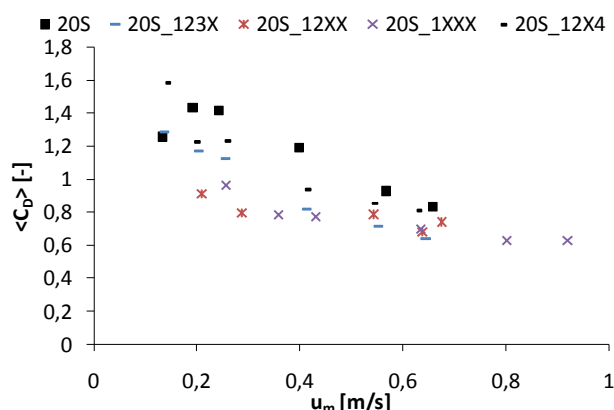


Abb. 5.26 Widerstandsbeiwert $\langle C_D \rangle$ in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m .

Die Versuchsergebnisse in Abb. 5.26 zeigen weiterhin, dass der Widerstandsbeiwert C_D abhängig von der Blattflächenverteilung ist und damit tendenziell keine speziesspezifische Konstante darstellt, wie dies u.a. von JÄRVELÄ (2004) für Gl. (2.32) vorgeschlagen wurde. Weiterhin ist eine deutlich Abhängigkeit zwischen Widerstandsbeiwert und Strömungsgeschwindigkeit zu erkennen, wobei die prozentuale Abnahme des Widerstandsbeiwertes signifikant ist und nicht vernachlässigt werden kann.

Die Versuchsreihen mit variierender Blattfläche an künstlichen und natürlichen Einzelpflanzen (vgl. Abschnitt 4.2.1 und Abschnitt 4.2.2) zeigten bereits, dass eine Normierung der Widerstandskräfte über die einseitige Blattfläche erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Ergebnisse des Bewuchsfeldes bestätigen diese Ergebnisse, wobei angemerkt werden muss, dass in diesen Versuchsreihen ganze Zweige (3 Blätter) entfernt wurden und bei den Versuchsreihen mit den Einzelpflanzen einzelne Blätter entfernt worden sind, was jedoch zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

In Abb. 5.27 sind die räumlich gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsprofile der Versuchsreihen 20S_1XXX, 20S_12XX, 20S_123X, 20S_12X4 und 20S dargestellt. Die Geschwindigkeitsprofile wurden über die mittlere Fließtiefe h und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m normiert. Die Profile sind bis zu einer Fließtiefe von ca. 80% dargestellt, da die oberen 20% aufgrund eines nach unten schauenden ADV nicht erfasst werden konnten.

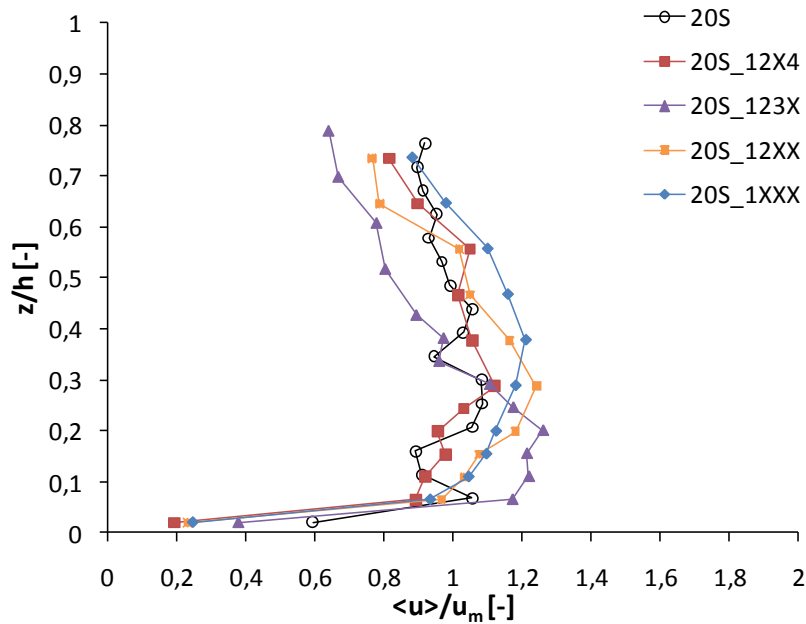


Abb. 5.27 Räumliche gemittelte Geschwindigkeitsprofile, normiert über die mittlere Fließtiefe h und die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit u_m .

Die Abbildung zeigt für die Versuchsreihe 20S im vollständig belaubten Zustand einen näherungsweise konstanten Verlauf des vertikalen Geschwindigkeitsprofils. Dies weist darauf hin, dass der Vegetationswiderstand gleichmäßig über die Pflanzenhöhe verteilt ist. Dies wiederum steht im Einklang mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3, wo eine geringfügige Änderung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bei steigender Fließtiefe gemessen wurde. Der visuelle Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in Abb. 5.27 belegt den erwarteten Einfluss der vertikalen Blattflächenverteilung auf die räumlich gemittelten, vertikalen Geschwindigkeitsprofile. Im Vergleich mit Versuchsreihe 20S weisen die Profile der Versuchsreihen 20S_123X, 20S_12XX und 20S_1XXX in der Ebene unterhalb der Blätter, erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten auf und in der Ebene der durchströmten Blätter verzögerte Strömungsgeschwindigkeiten, wobei die Unterschiede im Bereich von $\pm 20\%$ liegen. Demgegenüber können für die Versuchsreihe 20S_12X4 im Vergleich zu der Versuchsreihe 20S keine signifikant höheren Strömungsgeschwindigkeiten in der Ebene festgestellt werden, in welcher die Blätter entfernt worden sind.

Im Vergleich zur Änderung des räumlich gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsprofils durch die vertikale Variation der Blattfläche ist in Abb. 5.28a die aus dem Kräftegleichgewicht berechnete Sohlenschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für die Versuchsreihen dargestellt. Die Abbildung zeigt unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung näherungsweise übereinstimmende Werte der Sohlenschubspannung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten. Dieses Ergebnis ist zunächst überraschend, da erwartet wurde, dass sich die Änderung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils auf die Größe der Sohlenschubspannung auswirkt. Bei vergleichbarer mittlerer Strömungsgeschwindigkeit wurden größere Werte der Sohlenschubspannung aufgrund größerer sohlennaher Strömungsgeschwindigkeiten für die Versuchsreihen 20S_123X und 20S_12XX gegenüber 20S erwartet. Die geringen Abweichungen der τ_0' -Werte zwischen den Versuchsreihen, weisen hingegen darauf hin, dass die vertikale Blattflä-

chenverteilung keine signifikanten Auswirkungen auf die räumlich gemittelte Sohlenschubspannung hat. Unter den gegebenen Randbedingungen ist die Höhe der Sohlenschubspannung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung. Dies ist auf die relativ geringen Änderungen der vertikalen Geschwindigkeitsprofile in Sohlennähe zurückzuführen (vgl. Abb. 5.27), die folgendermaßen erklärt werden können:

Die Erwartungshaltung, dass die Strömung in durchströmter Vegetation, welche im sohlennahen Bereich einen geringen Vegetationswiderstand aufweist (vgl. Abb. 2.4 rechts), durch die Blätter und Äste im oberen Teil der Vegetation in Richtung Sohle abgelenkt wird, ist durch eine zweidimensionale Vorstellung geprägt. Hierbei wird eine Umströmung der Vegetationselemente nicht berücksichtigt. Diese Erwartungshaltung setzt für Bewuchsfelder voraus, dass die Dichte des Bewuchsfeldes so hoch ist, dass eine Umströmung der Elemente weitgehend verhindert wird. Aus Abb. 5.23c und d wird jedoch ersichtlich, dass im vorliegenden Fall eine Umströmung der Vegetationselemente über die gesamte Fließtiefe möglich ist. Die Vegetationsdichte ist in Kombination mit den verwendeten Vegetationselementen zu gering, um die Strömung signifikant sohlennah abzulenken. Stattdessen findet eine seitliche Umströmung der Vegetationselemente statt. Dies erklärt zudem die relativ geringen Änderungen in den räumlich gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsprofilen der teilbelaubten Versuchsreihen in Abb. 5.27 im Vergleich zur vollständig belaubten Versuchsreihe 20S.

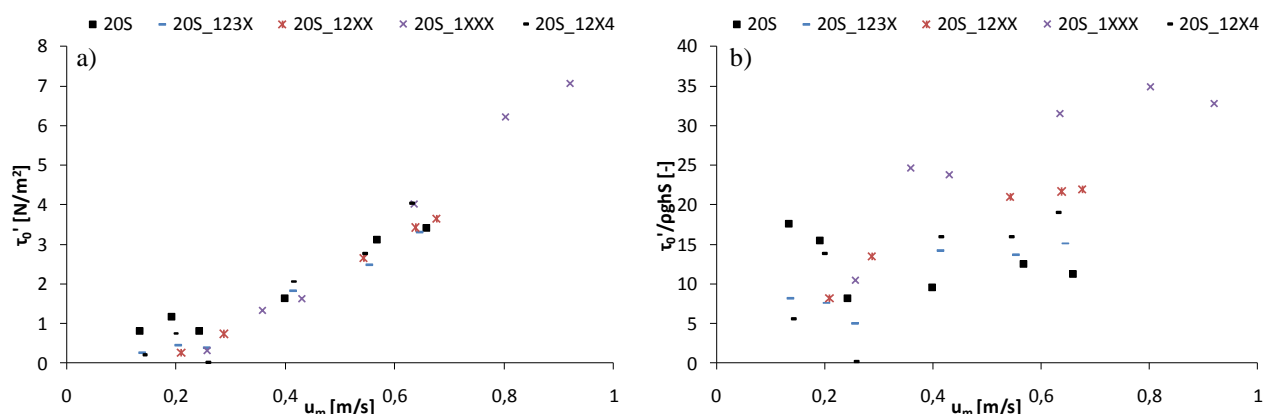


Abb. 5.28 (a) Sohlenschubspannung τ_0' und (b) Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m für die Versuchsreihen 20S, 20S_{123X}, 20S_{12XX}, 20S_{1XXX} und 20S_{12X4} mit variierender vertikaler Blattflächenverteilung.

In Abb. 5.28b ist der prozentuale Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Abbildung zeigt eine Staffelung der Versuchsreihen entsprechend der absoluten Blattfläche. Für die Versuchsreihe mit der größten Blattfläche 20S sind die $\tau_0'/\rho ghS$ -Werte am kleinsten, und für die Versuchsreihe mit der kleinsten Blattfläche 20S_{1XXX} sind die Werte am größten. Diese Staffelung stimmt mit einem größeren Vegetationswiderstand stärker belaubter Vegetationselemente (resultierend aus Abb. 5.24) und einer von den Vegetationselementen unabhängigen Sohlenschubspannung überein.

Die $\tau_0'/\rho ghS$ -Werte in Abb. 5.28b weisen, wie in Abschnitt 5.1 für die vollständig belaubten künstlichen Pappelzweige, im Bereich hoher mittlerer Strömungsgeschwindigkeiten auf einen

konstanten Verlauf in Abhängigkeit der vertikalen Blattflächenverteilung hin. Weiterhin zeigen die Maximalwerte von τ_0' in Höhe von 35% der Gesamtschubspannung ρghS , dass die Sohlenschubspannung τ_0' nicht pauschal vernachlässigt werden kann.

Fazit: Die Versuche zeigen für die vorliegenden Versuchsrandbedingungen ($a_x = a_y = 20$ cm, versetzte Anordnung), dass die Größe der Sohlenschubspannung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung ist und sich die Variation der vertikalen Blattflächenverteilung nur geringfügig ($\pm 20\%$) auf das räumlich gemittelte Geschwindigkeitsprofil auswirkt.

Die Erwartungshaltung, dass die vertikale Verteilung der Blattfläche einen signifikanten Einfluss auf das vertikale Geschwindigkeitsprofil hat und im Fall von unbelaubten sohlennahen Bereichen die Sohlenschubspannung signifikant erhöht wird, ist wesentlich von der Vegetationsstruktur und der Vegetationsdichte abhängig. Für die vorliegenden Versuchsrandbedingungen wurde diese Erwartungshaltung nicht erfüllt. Die Voraussetzung für die Erfüllung dieser Erwartungshaltung ist, dass die Vegetationsdichte so groß ist, dass in Kombination mit einer geeigneten Vegetationsstruktur, der wesentliche Teil der Strömung nicht zwischen den stromlinienförmig ausgerichteten Elementen hindurchfließen kann. Es ist fragwürdig, ob in der Natur die erforderliche Kombination aus der Pflanzenstruktur (sohlennah offene Bereiche) und einer hohen Vegetationsdichte vorkommt und der Einfluss der vertikalen Blattflächenverteilung auf die Sohlenschubspannung weiterhin untersucht und berücksichtigt werden sollte. Untersuchungen, welche natürliche Dichten und Vegetationsstrukturen analysieren, können über die Notwendigkeit einer weiteren Verfolgung dieser Fragestellung Aufschluss geben.

5.5 Gegenüberstellung der Messergebnisse mit Berechnungsergebnissen aus Ansätzen zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes in Bewuchsfeldern

In Abschnitt 2.2.2 wurden verschiedene Ansätze vorgestellt, mit denen die Sohlenschubspannung, bzw. die Schubspannungsaufteilung im Vegetationsfeld bestimmt werden kann. Anhand der durchgeführten Versuchsreihen kann ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und der verschiedenen Ansätze zur Bestimmung der Sohlenschubspannung in Bewuchsfeldern erfolgen.

5.5.1 Ansatz von RAUPACH (1992)

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass der Ansatz von RAUPACH (1992) oder RAUPACH ET AL. (1993) bislang nur auf starre Elemente mit einfacher Geometrie (Zylinder, Würfel) angewendet worden ist. Eine Anwendung des Ansatzes von RAUPACH (1992) auf flexible Vegetationselemente mit komplexer Geometrie ist experimentell bislang nicht durchgeführt worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Ansatzes von RAUPACH (1992) zur Schubspannungsaufteilung mit den

experimentell gewonnenen Messergebnissen verglichen. Dazu werden alle zuvor diskutierten Datenreihen, mit Ausnahme der Datenreihen mit variierender relativer Fließtiefe h/H , verwendet.

Nach dem Ansatz von RAUPACH ET AL. (1993) kann das Verhältnis der Schubspannungen $R = (\tau_s/\tau)^{0,5}$ nach Gl. (2.39) berechnet werden. Die Berücksichtigung des Verhältnisses der Grundfläche zur frontal angeströmten Fläche der Rauheitselemente erfolgt über die Variable σ_A . Bei starren Elementen kann σ_A über die geometrischen Abmessungen der Rauheitselemente bestimmt werden und ist unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Bei flexiblen Elementen kann σ_A jedoch nicht eindeutig bestimmt werden, da die Grundfläche im vorliegenden Fall nicht nur aus dem Stammdurchmesser besteht. Als Ersatzfläche könnte die horizontal projizierte Fläche in Betracht gezogen werden. Diese konnte unter der Randbedingung gerade überströmter Vegetationselemente jedoch nicht in den Versuchen ermittelt werden. Die Bestimmung von R wurde daher für die flexiblen Elemente nach Gl. (2.38) durchgeführt, wobei Gl. (2.38) gleichbedeutend ist mit R^2 . Für die starren Zylinder ist anzumerken, dass σ_A aufgrund des geringen Elementdurchmessers (1 cm) sehr klein ist.

Weiterhin wurde zur Bestimmung des Verhältniswertes $\beta = C_R/C_S$ für den Widerstandsbeiwert der Rauheitselemente C_R der räumlich gemittelte Widerstandsbeiwerte der Kraftmessungen $\langle C_D \rangle$ verwendet und der Widerstandsbeiwert der Sohlenoberfläche C_S nach Gl. (2.42) bestimmt. Dazu wurde für die raue Sohle, entsprechend der Vorgehensweise von THOMPSON ET AL. (2004), bei stationär-gleichförmigen Strömungsbedingungen und konstanter Neigung $S = 0,0868 \%$ der Durchfluss ($0,01 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 0,1085 \text{ m}^3/\text{s}$) und somit die Fließtiefe ($0,052 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m}$) variiert. Zwischen Durchfluss Q und C_S wurde ein Zusammenhang festgestellt, welcher durch eine lineare Regressionsgerade wie folgt beschrieben werden kann:

$$C_{S,rau} = -0,01327Q + 0,0037 \quad (4.1)$$

Weiterhin wurde bei konstanter Fließtiefe h die Neigung S und der Durchfluss Q und somit die Strömungsgeschwindigkeit u_m variiert, wobei näherungsweise konstante C_S -Werte bestimmt worden sind.

Für die glatte Sohlenoberfläche wurde keine Abhängigkeit zwischen Q und C_S untersucht. Bei konstanter Fließtiefe $h \approx 25 \text{ cm}$ wurde ein aus drei Messungen gemittelter Wert $C_{S,glatt} = 0,01637$ berechnet.

In Abb. 5.29 sind die Ergebnisse der Messungen für R den Ergebnissen der Berechnungen nach dem theoretischen Ansatz von RAUPACH (1992) unter den oben beschriebenen Abweichungen dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass mit Ausnahme der Datenreihe „20S_glatt“ die gemessenen Werte signifikant durch die Theorie von RAUPACH (1992) unterschätzt werden. Weiterhin liegt eine hohe Streubreite der gemessenen Werte vor. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten können auf das flexible Verhalten der Vegetationselemente und die komplexe Formgebung der Elemente zurückgeführt werden. Der Ansatz von RAUPACH basiert auf der vereinfachenden Annahme, dass jedes Rauheitselement einen Abschattungseffekt hervorruft wodurch die Sohlenschubspannung auf einer Fläche, welche proportional zu den Abmessungen des Rauheitselementes ist, verringert bzw. aufgehoben wird.

Aufgrund des geringen Stammdurchmessers und der hohen Flexibilität der Pappelzweige kann sich kein konstanter Abschattungsbereich in Sohlennähe gemäß des Ansatzes von RAUPACH (1992) ausbilden. Der Abschattungseffekt wird im Wesentlichen durch die Blätter hervorgerufen, wobei diese aufgrund ihrer Flexibilität variabel auf den Strömungsangriff reagieren. Weiterhin kommt es aufgrund der komplexen Form und der hohen Flexibilität zu einer Interaktion zwischen der Strömung und der Vegetation, wodurch das Strömungsfeld im sohlennahen Bereich beeinflusst werden kann. Bei zylindrischen oder kubischen Elementen deren Form über die Höhe unveränderlich ist, kann dies nicht erwartet werden.

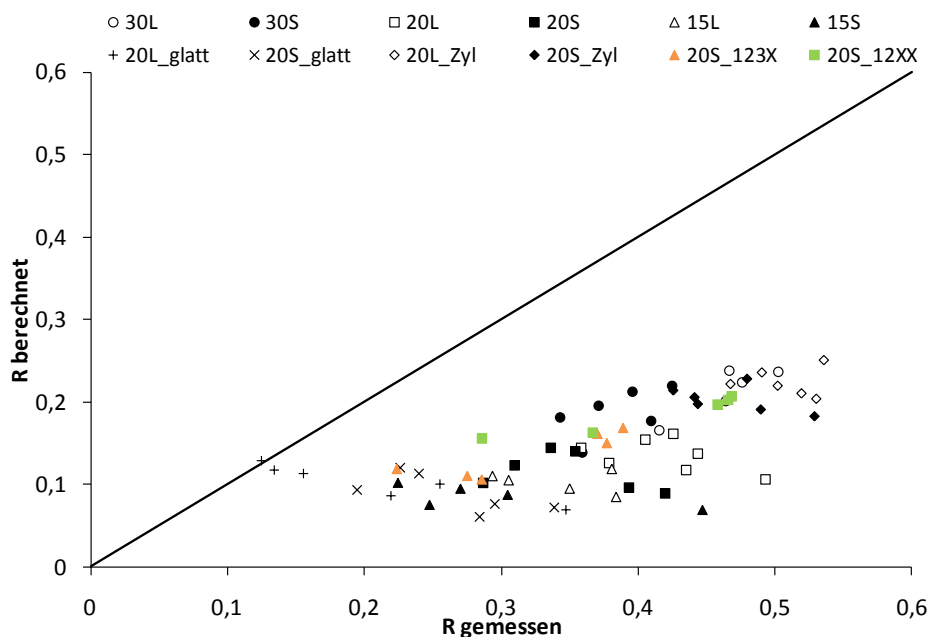


Abb. 5.29 Gegenüberstellung zwischen gemessenen Werten und nach der Theorie von RAUPACH (1992) berechneten Werten des Verhältnisses R zwischen Sohlenschubspannung und Gesamtschubspannung.

In Abb. 5.30 ist das Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit R_f in Abhängigkeit der Elementdichte λ dargestellt. Abgebildet sind die Ergebnisse aus Modellversuchen unterschiedlicher Autoren, in welchen ausschließlich starre Rauheitselemente unterschiedlicher Formen in Windkanälen untersucht worden sind. Weiterhin dargestellt sind die Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit starren Elementen aus TURPIN ET AL. (2010) und zwei Datensätze aus Felduntersuchungen von MUSICK & GILLETTE (1990) sowie GILLIES ET AL. (2007). Von den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchsreihen sind die Ergebnisse der Messungen des Anteils der Sohlenschubspannung am Gesamtwiderstand der vollständig belaubten Pappelzweige mit rauher und glatter Sohlenoberfläche, mit Variation der Blattfläche und die Versuchsreihen mit starren Zylindern dargestellt. Weiterhin ist als gesamte Datenreihe das für die Versuchsrandbedingungen der Versuchsreihen berechnete Ergebnis nach der Theorie von RAUPACH (1992) für die Pappelzweige sowie nach RAUPACH ET AL. (1993) für die Zylinder dargestellt.

Die Abbildung zeigt neben dem allgemeinen Trend sinkender R_f -Werte mit steigendem λ eine hohe Streubreite der Literaturdaten. TURPIN ET AL. (2010) bezogen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Literaturdaten auf eine Kombination verschiedener Faktoren, welche den Messbereich sowie die Geometrie der Versuchsanlage und der Rauheitselemente einschließen. THOMPSON

ET AL. (2004) zeigten hingegen, dass der Verhältniswert R_t nicht nur von λ , sondern ebenfalls von β abhängig ist. β bleibt in dieser Darstellung jedoch unberücksichtigt. GILLETTE & STOCKTON (1989) bestimmten die Genauigkeit ihrer Messungen zu $\pm 20\%$, was einen Teil der Schwankungsbreite der Messungen erklärt. Weiterhin beschrieben sie die Diskrepanzen zu den Messungen von MARSHALL (1971) als Resultat unterschiedlicher experimenteller Skalen und der Sensitivität der Bestimmung der Schubbeanspruchung. Die Ergebnisse von MARSHALL (1971) weisen von den gesamten dargestellten Datenreihen die kleinsten Anteile der Sohlenschubbeanspruchung im Bereich großer λ -Werte auf. TURPIN ET AL. (2010) beurteilten die Ergebnisse ihrer numerischen Berechnungen für kugelförmige und zylindrische Elemente als gut übereinstimmend mit den hier dargestellten Datenreihen der anderen Autoren.

In Abb. 5.30 sind weiterhin die Ergebnisse der Untersuchungen von THOMPSON ET AL. (2004) (Dreiecke, Orange) für alle untersuchten Elementgeometrien dargestellt. Die Ergebnisse zeigen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von MARSHALL (1971) sowie von LYLES & ALLISON (1975) und TURPIN ET AL. (2010) mit den zylindrischen Elementen. Größere Abweichungen bestehen zu den Ergebnissen der numerischen Berechnungen mit kugelförmigen Rauheitselementen von TURPIN ET AL. (2010).

Die Ergebnisse der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen (einzelne Datenreihen) sind im direkten Vergleich zu den Ergebnissen nach der Theorie von RAUPACH (1992) (Datenreihe „Theorie Raupach“) für die vorliegenden Versuchsrandbedingungen dargestellt. Die Ergebnisse der Datenreihe „Theorie Raupach“ weisen bereits eine Streubreite auf, welche auf Unsicherheiten bei der Bestimmung von A_P , C_R , C_S , h und S der flexiblen Vegetationselemente zurückzuführen ist. Zwischen den Ergebnissen der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit und den Versuchsergebnissen von THOMPSON ET AL. (2004), GILLETTE & STOCKTON (1989), MUSICK & GILLETTE (1990) sowie MCKENNA NEUMANN & NICKLING (1995) liegt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung vor. Die Ergebnisse der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit und der Ergebnisse aller weiterer Autoren zeigen, dass der Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung entgegen der Theorie von RAUPACH (1992) für $\lambda = 0,03-0,1$ nicht vernachlässigbar ist.

Versuchsergebnisse, die in Strömungen mit unterschiedlichen Fluideigenschaften durchgeführt worden sind, werden in der Regel auf einen vergleichbaren Reynoldszahlenbereich bezogen, um eine Vergleichbarkeit untereinander herzustellen. Die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse von unterschiedlichen Autoren, kann jedoch nicht generell vorausgesetzt werden, da zur Berechnung der Reynoldszahl notwendige Übereinstimmung der charakteristischen Länge nicht immer gegeben ist. MARSHALL (1971) führte seine Untersuchungen bspw. in einem Reynoldszahlenbereich zwischen $Re = 8 \cdot 10^4$ und $Re = 1,87 \cdot 10^5$ durch. Als charakteristische Länge wurde die Höhe der Rauheitselemente gewählt und als Referenzgeschwindigkeit die Windgeschwindigkeit in zweifacher Pflanzenhöhe.

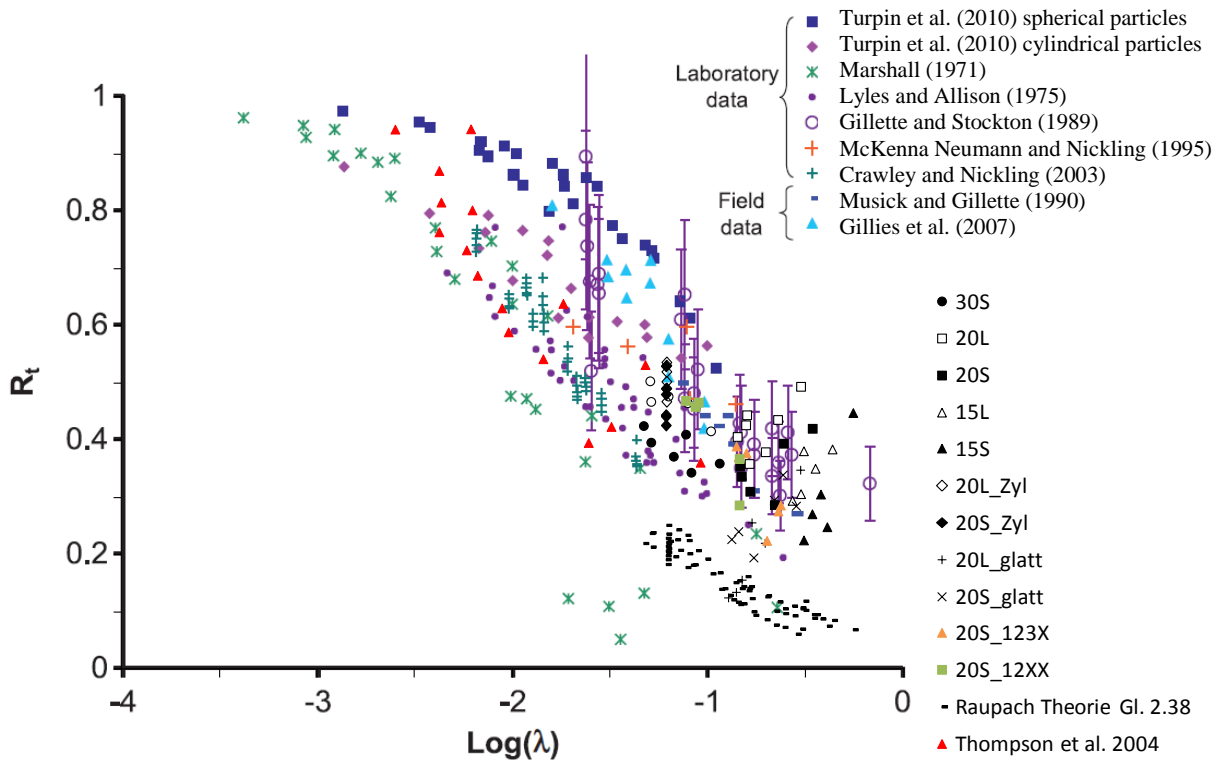


Abb. 5.30 Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit R_t in Abhängigkeit der Elementdichte λ . Neben den Ergebnissen aus Modellversuchen unterschiedlicher Autoren sind die Ergebnisse aus numerischen Berechnungen von TURPIN ET AL. (2010) und die Ergebnisse der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit dargestellt. Die Abbildung wurde aus TURPIN ET AL. (2010) entnommen und modifiziert.

Eine weitere Darstellung der Ergebnisse der Versuche der vorliegenden Arbeit und der Versuche von THOMPSON ET AL. (2004) zeigt Abb. 5.31. Darin sind die Ergebnisse von THOMPSON ET AL. (2004) für die Zylinder getrennt nach den Durchmessern $d = 2,54$ cm (Kreise, Blau, geschlossen) und $d = 0,95$ cm (Kreise, Blau, offen) dargestellt. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Datenreihen „20L_Zyl“ und „20S_Zyl“ ($d = 1$ cm) liegt eine höhere Übereinstimmung zwischen den Datenreihen „20L_Zyl“ und „20S_Zyl“ und der Datenreihe mit $d = 2,54$ cm als mit der Datenreihe mit $d = 0,95$ cm von THOMPSON ET AL. (2004) vor. Als mögliche Ursachen sind stationär ungleichförmige Strömungsbedingungen und die im Vergleich zu diesen Messungen sehr geringen Fließtiefen $h = 2,5 - 5,8$ cm in den Versuchen von THOMPSON ET AL. (2004) zu nennen.

Im Unterschied zu den starren Zylindern, bei denen die Messergebnisse unabhängig von λ sind, liegt bei den Ergebnissen mit den flexiblen Pappelzweigen eine Abhängigkeit von λ vor. Dies ist auf das stromlinienförmige Verhalten der flexiblen Pappelzweige zurückzuführen. Tendenziell sind mit steigender Strömungsgeschwindigkeit, was äquivalent zu einer sinkenden angeströmten Fläche ($A_P = bh$) ist, bei den Datenreihen 30L und 30S größere R_t –Werte zu beobachten. Bei allen weiteren Datenreihen ist diese Tendenz nicht zu erkennen, sodass abschließend keine allgemeine Aussage zur Abhängigkeit zwischen R_t und λ getroffen werden kann. Das stromlinienförmige Verhalten wirkt sich weiterhin auf den Widerstandsbeiwert $C_D = C_R$ der Vegetationselemente aus, sodass eine Abhängigkeit der in Abb. 5.31 dargestellten Datenreihen von β besteht. THOMPSON ET

AL. (2004) stellten in ihren Versuchen fest, dass eine Abhängigkeit zwischen β und der Fließtiefe h besteht, wobei sich der C_S -Wert in Abhängigkeit des Durchflusses Q ändert (vgl. Abschnitt 2.2.2).

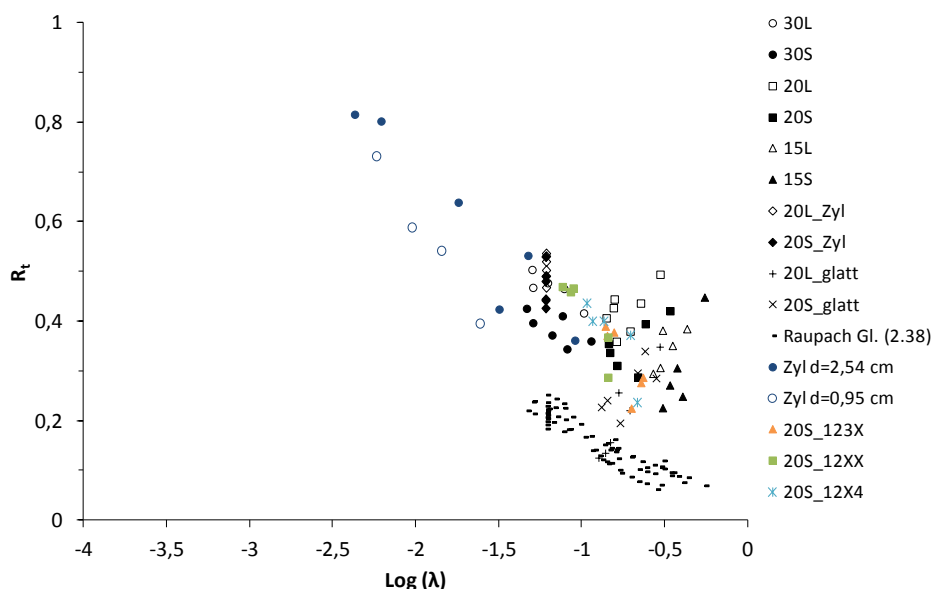


Abb. 5.31 Verhältnis der Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit R_t in Abhängigkeit der Elementdichte λ . Ergebnisse der Versuchsreihen dieser Arbeit im Vergleich mit den Zylinderdaten von THOMPSON ET AL. (2004) und den theoretischen Ergebnissen nach RAUPACH (1992).

BROWN ET AL. (2008) stellen im Vergleich zu den Versuchsergebnissen von MARSHALL (1971) sowie CRAWLEY & NICKLING (2003) eine gute Übereinstimmung mit den eigenen Versuchsergebnissen fest. Sie folgerten, dass die Anordnung nur geringen Einfluss auf die Schubspannungsaufteilung hat. Weiterhin folgerten sie, dass eine versetzte und eine zufällige Anordnung effektiver Kräfte dissipieren als eine Reihenanordnung. Zwischen den versetzten und den zufälligen Anordnungen wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt. Sie stellten weiterhin fest, dass das Modell von RAUPACH ET AL. (1993) die gemessenen R -Werte leicht unterschätzt, was sie auf eine mögliche Überschätzung der Abschattungsfläche der Rauheitselemente bezogen. Im Wesentlichen stimmen diese Feststellungen mit den Ergebnissen aus den Versuchsreihen dieser Arbeit überein.

5.5.2 Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982)

TOLLNER ET AL. (1982) untersuchten die Sohlenschubspannung für umströmte, starre, zylindrische Vegetation. Für die Berechnung der Sohlenschubspannung in einem durchströmten Bewuchsfeld aus starren Zylindern ersetzen sie den hydraulischen Radius R_h durch einen auf den Abstand zwischen den Vegetationselementen bezogenen hydraulischen Radius R_s nach Gl. (2.43) (vgl. Abschnitt 2.2.2).

In Abb. 5.32 sind die Messergebnisse der Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu den berechneten Werten nach dem Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) dargestellt. Es ist anzumerken, dass bei der Berechnung der Ergebnisse nach TOLLNER ET AL. (1982) für die versetzte Anord-

nung der gleiche Vegetationsabstand a_y in Gl. (2.43) wie für die Reihenanordnung mit äquivalenter Vegetationsdichte verwendet wurde.

Die Abbildung zeigt für die Datenreihe „20L_Zyl“ eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten, wobei für die Datenreihe „20S_Zyl“ Abweichungen, resultierend aus den größeren Widerstandskräften, die bei versetzter Anordnung gemessen wurden, vorliegen. Unter Berücksichtigung des ermittelten systematischen Unterschieds zwischen der versetzten Anordnung und Reihenanordnung (Faktor 1,22) kann der Unterschied zwischen gemessenen und berechneten Werten reduziert werden.

Sehr große Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten liegen dagegen bei den künstlichen Pappelzweigen vor, wobei die gemessenen Werte ausnahmslos durch den Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) überschätzt werden.

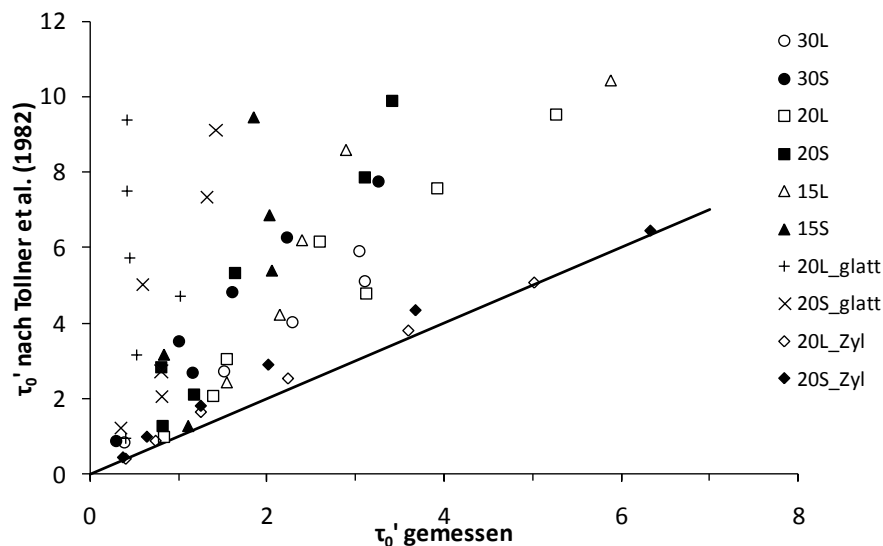


Abb. 5.32 Vergleich der gemessenen Sohlenschubspannungen mit den berechneten Werten nach TOLLNER ET AL. (1982)

Der Ansatz berücksichtigt keine von den zylindrischen Elementen abweichenden Geometrien der Vegetationselemente. Diese Einschränkung wirkt sich insbesondere bei flexiblen und belaubten Vegetationselementen negativ auf die Genauigkeit des Ansatzes aus, da der funktionale Zusammenhang zwischen dem Gesamtließwiderstand und der Pflanzeigenschaften für flexible Vegetationselemente unberücksichtigt bleibt.

Aufgrund dieser starken Einschränkung ist der Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) für die Bestimmung der mittleren Sohlenschubspannung in einem Vegetationsfeld aus flexiblen belaubten Pflanzen ungeeignet. Die hohe Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Sohlenschubspannungen für die Reihenanordnung der starren Zylinder bestätigt jedoch die Anwendbarkeit des Ansatzes unter diesen eingeschränkten Randbedingungen. Die Verwendung des halben transversalen Abstandes $a_y/2$, wie bspw. im Verfahren von LINDNER (1982), bei versetzter Vegetationsanordnung, führte zu keiner Erhöhung der Genauigkeit des Verfahrens von TOLLNER ET AL. (1982).

5.5.3 Ansatz von STRICKLER (1923) und das logarithmische Fließgesetz

Der Ansatz von STRICKLER (1923) und das logarithmische Fließgesetz sind vielfach angewendete Ansätze zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes über rauen Oberflächen. Obwohl die Anwendbarkeit dieser Ansätze für durchströmte Bewuchsfelder nicht verifiziert wurde, werden die Ansätze in durchströmten Bewuchsfeldern aufgrund fehlender Alternativansätze angewendet. Im Folgenden sollen die gemessenen Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen und die mit diesen Ansätzen ermittelten Berechnungsergebnisse miteinander verglichen werden.

In Abb. 5.33 sind die aus den Versuchen ermittelten und die mit den Ansätzen berechneten Darcy-Weißbach Widerstandskoeffizienten f' der Sohlenoberfläche als Funktion der relativen Überdeckung h/k_s dargestellt. Für die geometrische Rauheitshöhe k_s in Gl. (2.45) und (2.46) wurde die Höhe der Rauheitselemente mit $k_s = 3$ mm verwendet. Die Abbildung zeigt, dass der Ansatz von STRICKLER (1923) und das logarithmische Fließgesetz den Fließwiderstand der Sohlenoberfläche unterschätzen.

Die Differenzen zwischen den f' -Werten der Versuche und den mit den Ansätzen berechneten f' -Werten sind auf die Annahmen zurückzuführen, die bspw. für das logarithmische Fließgesetz getroffen werden, in einem durchströmten Bewuchsfeld jedoch nicht zutreffen. Das log-Gesetz basiert auf der Annahme, dass die Oberflächenrauheit der Sohle die Hauptursache für die Energieverluste darstellt und sich ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil über der rauen Oberfläche ausbildet. In durchströmten Bewuchsfeldern liegt jedoch kein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil vor (LINDNER 1982, ROWINSKI & KUBRAK 2002 und andere, vgl. Abschnitt 5.4) und der Hauptanteil des Fließwiderstandes wird durch die Vegetation hervorgerufen (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Für eine bestimmte Strömungssituation mit gegebenem Durchfluss Q , Sohlenneigung S und Sohlenrauheit k_s stellt sich eine konkrete Fließtiefe h unter stationär-gleichförmigen Bedingungen ein. Wird eine zusätzliche Formrauheit in der Form von Vegetation hinzugefügt, so steigt bei gleichbleibenden Bedingungen die Wassertiefe h an. Unter Verwendung dieser höheren Wassertiefe wird der durch Gl. (2.45) und (2.46) berechnete Sohlenwiderstand nicht korrekt wiedergegeben.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen weiterhin, dass mit steigender relativer Überdeckung der Widerstandskoeffizient steigt. Im Gegensatz dazu zeigen die Berechnungsergebnisse nach Gl. (2.45) und (2.46) in Abb. 5.33 sinkende Widerstandskoeffizienten bei steigender relativer Überdeckung h/k_s . Außerdem zeigen die Ergebnisse in Abb. 5.33, dass die Pflanzendeformation und die Interaktion zwischen Pflanzenwiderstand, Sohlenwiderstand und dem sohlennahen Strömungsfeld in den beiden verwendeten Ansätzen unberücksichtigt bleiben. Daraus resultierend unterscheiden sich die Berechnungsergebnisse aus Gl. (2.45) und (2.46) zwischen starrer (hervorgehoben in Rot) und flexibler Vegetation nicht.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass der Ansatz nach STRICKLER (1923) und das logarithmische Fließgesetz nicht geeignet sind, den Sohlenwiderstand in einem durchströmten Bewuchsfeld aus flexibler belaubter Vegetation und starrer Vegetation zu bestimmen.

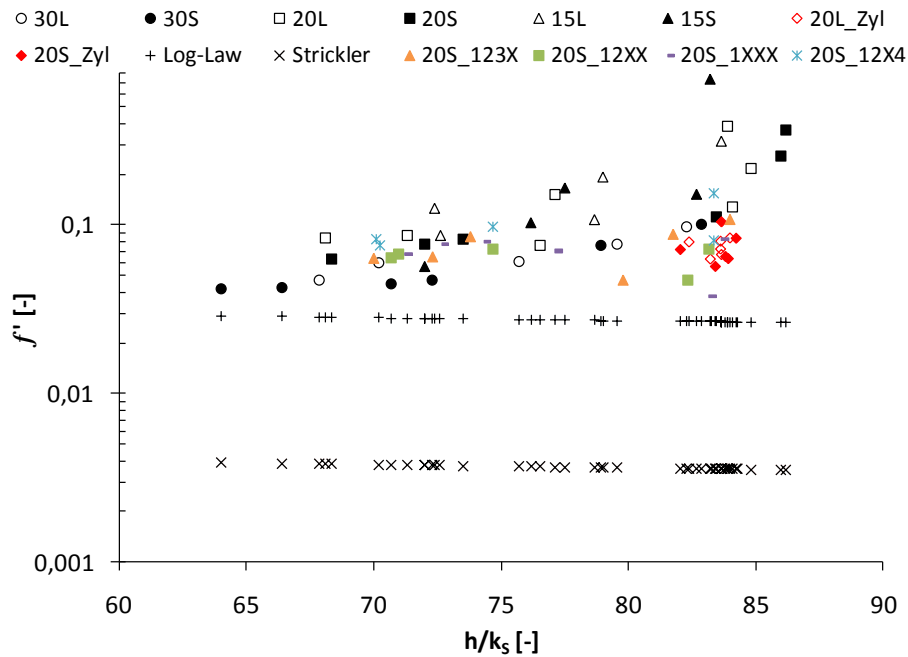


Abb. 5.33 Gemessene und berechnete Widerstandskoeffizienten f^* der Sohle als Funktion der relativen Überdeckung h/k_s .

5.5.4 Sohlennahe turbulente kinetische Energie (TKE)

Die Literaturrecherche ergab, dass bislang noch kein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Sohlenschubspannungen, welches auf Turbulenzmessungen basiert, vorhanden ist. BIRON ET AL. (2004) zeigten jedoch, dass die Methode der Bestimmung der turbulenten kinetischen Energie TKE am besten geeignet ist, in komplexen Strömungsfeldern die Sohlenschubspannungen abzuschätzen.

Das turbulente sohlennahe Strömungsfeld wurde bei allen Versuchsreihen, mit Ausnahme der Versuchsreihe mit variabler relativer Fließtiefe h/H (Abschnitt 5.3) mittels eines 3D Akustik-Doppler-Velocimeter (ADV) gemessen. Die Positionen der 21 bis 23 einzelnen Datenpunkte (variierend je nach Vegetationsanordnung und -dichte) wurden in einem einzelnen Feld, dessen Größe durch die Vegetationsdichte bestimmt wurde, aufgenommen. Für die Versuchsreihen 30L und 30S war das Feld 30x30 cm groß, für die Versuchsreihen 20L und 20S betrug die Feldgröße 20x20 cm und für die Versuchsreihen 15L und 15S betrug die Feldgröße 15x15 cm. Die Positionen, an welchen die ADV-Messungen durchgeführt worden sind, wurden innerhalb des freien Bereiches, der nicht durch die Vegetationselemente verdeckt wurde, gleichmäßig verteilt (analog zu den vertikalen Geschwindigkeitsprofilen in Abschnitt 5.4). In der untersten Ebene betrug der Abstand zwischen der Unterkante des 9 mm hohen Messvolumens und der Sohle 0 mm. Für diese Ebene betrug der Abstand des Messvolumens demnach im Mittel $\Delta z = 0,45$ cm von Sohle. Für jede weitere Ebene wurde das Messvolumen in 1 cm Schritten von der Sohle entfernt, sodass der mittlere Abstand des Messvolumens von der Sohle in Ebene 2 $\Delta z = 1,45$ cm betrug und in Ebene 3 $\Delta z = 2,45$ cm. Mit den 21 bis 23 Datenpunkten des sohlennahen turbulenten Strömungsfeldes derselben Ebene wurde eine doppelte, zeitliche und räumliche Mittelung durchgeführt.

Die Schubspannung τ_{TKE} wurde nach Gl. (2.48) mit $C = 1$ aus der turbulenten kinetischen Energie (TKE) des doppelt gemittelten turbulenten sohlennahen Strömungsfeldes berechnet. In Abb. 5.34a, Abb. 5.35a und Abb. 5.36a ist die sohlennahe Schubspannung τ_{TKE} der untersten Ebene mit $\Delta z = 0,45$ cm, über den aus dem Kräftegleichgewicht ermittelten Sohlenschubspannungswerten τ_0' aufgetragen. Die Winkelhalbierende beschreibt dabei die perfekte Übereinstimmung zwischen den ermittelten Werten der beiden Verfahren.

Abb. 5.34a zeigt die ermittelten Werte τ_{TKE} und τ_0' für die Versuchsreihen mit vollständig belaubten künstlichen Pappelzweigen. Die Abbildung zeigt hohe Abweichungen von einer optimalen Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden, wobei die gemessenen Werte näherungsweise gleichmäßig über- und unterschätzt werden. In Abb. 5.34b ist τ_{TKE} in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit dargestellt und zeigt tendenziell steigende Werte mit steigender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit. Dies ist in Übereinstimmung mit τ_0' in Abb. 5.16. Größere Werte der Sohlenschubspannung für die Reihenanordnung können durch Abb. 5.34b nicht eindeutig bestätigt werden. Hier liegen teilweise widersprüchliche Messergebnisse aus dem sohlennahen turbulenten Strömungsfeld vor.

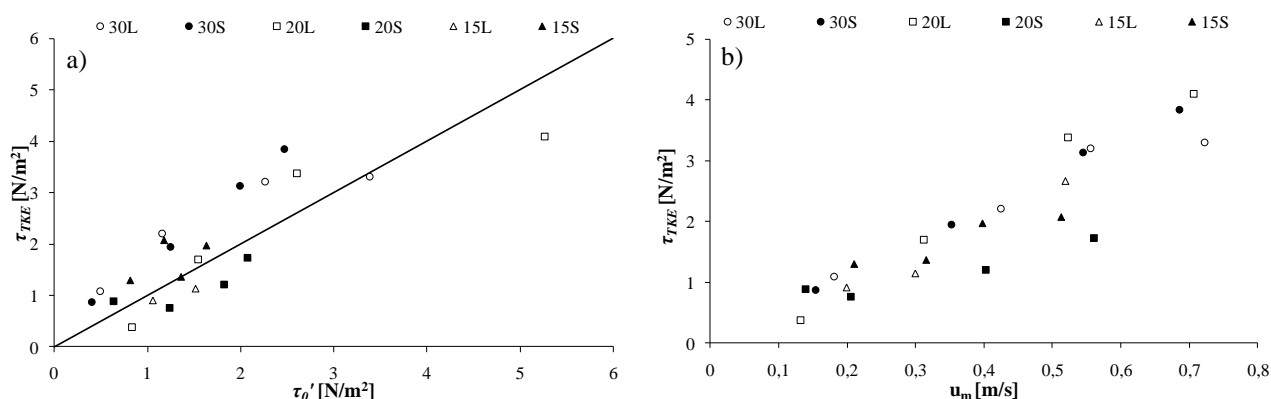


Abb. 5.34 a) Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' und b) τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für die Versuchsreihen mit vollständig belaubten Pappelzweigen

Vergleichbare Ergebnisse zeigen die Versuchsreihen mit den starren Zylindern (20S_Zyl und 20L_Zyl) und der glatten Sohle (20S_glatt und 20L_glatt) in Abb. 5.35a und b ($\Delta z = 0,45$ cm). Auch hier liegen widersprüchliche Ergebnisse von τ_{TKE} in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit vor (Abb. 5.35b). Entgegen der Beobachtung geringerer Sohlenschubspannungen der Versuchsreihen bei glatter Sohle (20s_glatt und 20L_glatt) gegenüber den Versuchsreihen bei rauher Sohle (20S und 20L), ergeben sich aus den Turbulenzmessungen Werte, welche sich in der gleichen Größenordnung befinden oder sogar bei glatter Sohle größer sind als bei der rauhen Sohle (vgl. Abb. 5.35b). Weiterhin ist die Abhängigkeit von der Anordnung nicht konsistent.

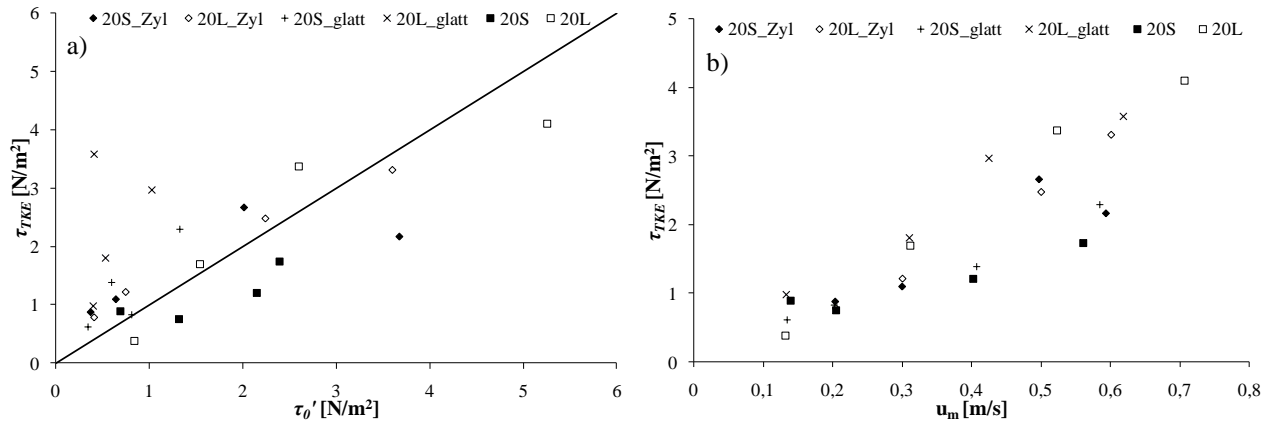


Abb. 5.35 a) Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' und b) τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für die Versuchsreihen mit glatter Sohle und starren Zylindern

In Abb. 5.36a sind die sohlennahen τ_{TKE} -Werte der untersten Ebene ($\Delta z = 0,45$ cm) in Abhängigkeit von τ_0' (berechnet aus dem Kräftegleichgewicht) für die Versuchsreihen mit einer vertikalen Variation der Blattfläche dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die τ_0' -Werte deutlich durch die τ_{TKE} -Werte unterschätzt werden. Weiterhin zeigt Abb. 5.36b, dass in der Versuchsreihe 20S_123X zwei Datenpunkte signifikant vom Trend der Versuchsreihe abweichen. Die Ursache für diese Ausreißer konnte nicht geklärt werden.

In Abb. 5.36c und d sind die sohlennahen τ_{TKE} -Werte der zweiten Ebene mit $\Delta z = 1,45$ cm über τ_0' dargestellt. Abb. 5.36c zeigt eine deutlich höhere Übereinstimmung der Schubspannungen der beiden Methoden als Abb. 5.36a. Insbesondere ist eine höhere Übereinstimmung bei den Versuchsreihen mit der vertikalen Variation der Blattflächen zu verzeichnen. Weiterhin zeigt Abb. 5.36b, analog zu Abb. 5.28a in Abschnitt 5.4, unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung, näherungsweise übereinstimmende Werte der Sohlenschubspannung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und einen näherungsweise linearen Anstieg mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Eine Verbesserung der Übereinstimmung zwischen τ_{TKE} und τ_0' für $\Delta z = 1,45$ cm konnte für die Datenreihen bei vollständiger Belaubung und mit glatter Sohle sowie mit den starren Zylindern nicht erreicht werden.

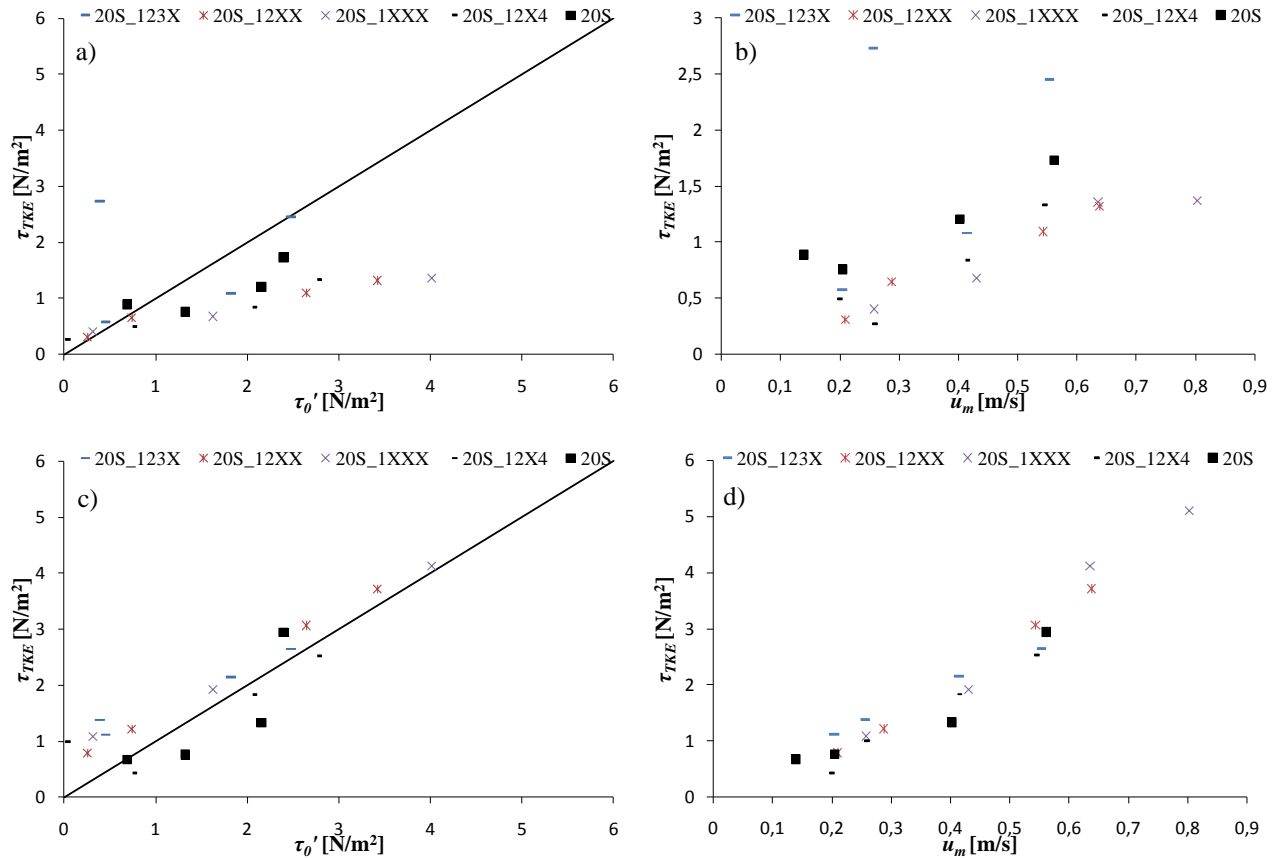


Abb. 5.36 Schubspannungen τ_{TKE} über τ_0' für $\Delta z = 0,45$ cm in a) und für $\Delta z = 1,45$ cm in c). τ_{TKE} in Abhängigkeit von u_m für $\Delta z = 0,45$ cm in b) und für $\Delta z = 1,45$ cm in d) für die Versuchsreihen mit variabler Blattflächenverteilung.

Für die teilweise hohen Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Einerseits ist ein Teil der Abweichungen auf die bereits beschriebene Streubreite der indirekt gemessenen Sohlenschubspannungswerte τ_0' (vgl. Abschnitt 5.1.3) zurückzuführen. Andererseits sind auch für das Verfahren der Bestimmung der Schubspannungen aus dem turbulenten sohlennahen Strömungsfeld τ_{TKE} Unsicherheiten vorhanden. Diese sind teilweise auf Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des räumlichen Mittelwertes zurückzuführen, da es bis heute nicht möglich ist die erforderliche Anzahl von Datenpunkten a priori festzulegen, welche zur Bestimmung eines repräsentativen räumlichen Mittelwertes der Strömungsparameter in einem Bewuchsfeld erforderlich ist. Zudem basiert die Bestimmung des räumlichen Mittelwertes in den Versuchen der vorliegenden Arbeit auf der Annahme, dass das räumlich gemittelte Strömungsfeld in jedem der durch die Vegetationselemente begrenzten Felder vergleichbar ist. Die Analyse der räumlichen Variabilität der Widerstandskräfte, der angeströmten Fläche und der Widerstandsbeiwerte der vollständig belaubten Vegetationselemente in Abschnitt 5.1.1 weist jedoch darauf hin, dass eine starke räumliche Variabilität der Strömung vorliegt und somit aus dieser Annahme Unsicherheiten für die Bestimmung des räumlichen Mittelwertes resultieren, da das turbulente Strömungsfeld nur in einem dieser Felder gemessen wurde. Weiterhin ist zu beachten, dass in Bereichen, welche durch die Vegetationselemente verdeckt waren, das Strömungsfeld mittels ADV-Messungen nicht quantifiziert werden konnte. In bewuchsfreien Zonen sind in der Regel jedoch sehr viel höhere Strömungsgeschwindigkeiten als in durch Vegetation

okkupierten Zonen oder im Nachlaufbereich von Vegetationselementen zu erwarten. Tendenziell führt dies zu einer Überschätzung der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und zu einer Unterschätzung der Turbulenzintensitäten.

Obwohl die Ergebnisse der Sohlenschubspannung aus dem sohlennahen turbulenten Strömungsfeld τ_{TKE} und dem Kräftegleichgewicht τ_0 teilweise hohe Abweichungen aufweisen, sind tendenziell vergleichbare Ergebnisse erzielt worden. Dies weist darauf hin, dass die turbulente kinetische Energie zur Bestimmung der Sohlenschubspannungen im Bewuchsfeld geeignet ist. Aufgrund der großen Höhe des Messvolumens mit 9 mm konnte keine detaillierte Analyse durchgeführt werden in welchem Abstand zur Sohle die höchste Übereinstimmung zwischen den beiden angewendeten Verfahren vorliegt. Ein widersprüchliches Ergebnis ist, dass in den Versuchsreihen mit variabler Blattflächenverteilung die höchste Übereinstimmung zwischen den Verfahren in einem Abstand $\Delta z = 1,45$ cm und bei allen weiteren Versuchsreihen in einem Abstand $\Delta z = 0,45$ cm gemessen wurde. Weitere Messungen sind daher mit einem Messverfahren (bspw. LDA) erforderlich, welches eine höhere Auflösung des sohlennahen turbulenten Strömungsfeldes ermöglicht. Weiterhin ist es erforderlich, die Genauigkeit bei der Bestimmung des räumlichen Mittelwertes des Strömungsfeldes zu erhöhen.

5.6 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse erstmalig durchgeführter experimenteller Untersuchungen zur Bestimmung des Sohlen- und Vegetationswiderstandes von durchströmter flexibler und belaubter Vegetation vorgestellt. Grundlage der Untersuchungen bildete das Kräftegleichgewicht an einem Volumenelement des durchströmten Bewuchsfeldes, wonach sich der Gesamtströmungswiderstand aus dem Sohlen- und Vegetationswiderstand zusammensetzt. Für die Quantifizierung des Vegetationswiderstandes wurde ein neu entwickeltes Kraftmesssystem eingesetzt, welches unterhalb der Gerinnesohle angeordnet war und eine direkte und simultane Ermittlung der Widerstandskräfte von bis zu zehn Vegetationselementen mit einer hohen Genauigkeit ermöglichte, ohne das Strömungsfeld zu beeinflussen.

Voraussetzung für die Untersuchungen war eine homogene Verteilung des Vegetationswiderstandes im Bewuchsfeld und über die Versuchsdauer konstante Vegetationseigenschaften. Um diese Randbedingungen einzuhalten, war es notwendig, natürliche durch künstliche Vegetation zu ersetzen. Als künstliches flexibles und belaubtes Vegetationselement wurde der in Kapitel 4 detailliert untersuchte künstliche Pappelzweig ausgewählt. Für Vergleichszwecke zu bestehenden Arbeiten wurden weiterhin starre Zylinder mit einem Durchmesser $d = 1$ cm verwendet.

In Abschnitt 5.1 wurde zunächst die Abhängigkeit des Sohlen- und Vegetationswiderstandes von der Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 15, 20, 30$ cm) und der Vegetationsanordnung (Reihenordnung und versetzte Anordnung) untersucht. Die Versuche wurden unter Normalabflussbedingungen und mit gerade überströmten Vegetationselementen durchgeführt. Obwohl in allen Versuchsreihen identische Vegetationselemente verwendet worden sind, zeigten die Untersuchungsergebnisse, dass die räumliche Variabilität der Widerstandskräfte sowohl bei den starren Zylindern als auch bei den flexiblen Vegetationselementen signifikant ist. Die räumliche Variabilität der Widerstandskräfte, welche unabhängig von der Vegetationsanordnung und der Vegetationsdichte ist, zeigte, dass die Messung der Widerstandskräfte eines einzelnen oder weniger Vegetationselemente im Bewuchsfeld zu einer signifikanten Unter- oder Überschätzung der räumlich gemittelten Widerstandskräfte führen kann. Es ist daher zu empfehlen, die Widerstandskräfte einer möglichst hohen Anzahl von Vegetationselementen direkt zu bestimmen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergab, dass zwischen den räumlich gemittelten Widerstandskräften $\langle F_D \rangle$ und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m eine näherungsweise lineare Abhängigkeit für die flexiblen Pappelzweige besteht. Für die starren Zylinder wurde eine näherungsweise quadratische Abhängigkeit festgestellt. Desweiteren ergab ein Vergleich zwischen den Versuchsreihen im Bewuchsfeld und Versuchsreihen mit einem einzelnen Pappelzweig in einer ungestörten Strömung, dass in Bezug auf das Biegeverhalten, den Widerstandsbeiwert C_D , die angeströmte Fläche A_P und die Widerstandskraft F_D ein vollständig vergleichbares Verhalten zwischen dem isolierten Einzelement in einer ungestörten Strömung und den flexiblen Pappelzweigen im Bewuchsfeld vorliegt. Daraus wurde gefolgert, dass sich die flexiblen Pappelzweige im Bewuchsfeld nicht gegenseitig beeinflussen. Unter diesen Bedingungen können die räumlich gemittelten Widerstandskräfte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in einem

Bewuchsfeld aus identischen Vegetationselementen durch die Messung der Widerstandskräfte an einem isolierten Einzelement in einer ungestörten Strömung prognostiziert werden. Hierbei muss jedoch der Einfluss der Anordnung auf das Strömungsfeld berücksichtigt werden.

Bei der versetzten Anordnung wurden für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel um den konstanten Faktor 1,22 höhere räumlich gemittelte Widerstandskräfte $\langle F_D \rangle$ der künstlichen Pappelzweige und der starren Zylinder gemessen als bei der Reihenanordnung. Diese Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der Anordnung auf die Widerstandskräfte in Widerstandsfunktionen berücksichtigt werden muss, wenn sich die Vegetationselemente, wie im vorliegenden Fall, nicht gegenseitig beeinflussen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Einfluss der Anordnung auf den Vegetationswiderstand vereinfachend durch einen konstanten Faktor berücksichtigt werden kann. Eine genaue Bestimmung des Einflusses beliebiger Anordnungen ist jedoch nur unter Berücksichtigung der Charakteristiken der Nachlaufströmung hinter den Elementen möglich. Für starre Zylinder können die Verfahren von LI & SHEN (1973) und LINDNER (1982) angewendet werden. Bei flexibler Vegetation ist die Nachlaufströmung vom strukturellen Aufbau der Vegetationselemente und dem flexiblen Verhalten in der Strömung abhängig. Ein Verfahren liegt hierfür bislang nicht vor.

Die Auswertung und Analyse der räumlich gemittelten frontal projizierten Flächen $\langle A_p \rangle$ der flexiblen Vegetationselemente zeigte, dass $\langle A_p \rangle$ für vergleichbare mittlere Fließgeschwindigkeiten u_m unabhängig von der Anordnung und der Dichte ist. In Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Autoren wurden mit steigender mittlerer Strömungsgeschwindigkeit u_m sinkende $\langle A_p \rangle$ -Werte festgestellt. Resultierend aus den höheren Widerstandskräften bei vergleichbarer mittlerer Strömungsgeschwindigkeit wurden höhere Widerstandsbeiwerte $\langle C_D \rangle$ für die versetzte Anordnung als für die Reihenanordnung berechnet und mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sinkende $\langle C_D \rangle$ -Werte festgestellt. Daraus wurde gefolgert, dass die Verwendung von konstanten Widerstandsbeiwerten zu einer signifikanten Fehleinschätzung der berechneten Widerstandsgrößen führen kann.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von LI & SHEN (1973) und LINDNER (1982) wurden auch für die Versuchsreihen mit den starren Zylindern höhere Widerstandsbeiwerte $\langle C_D \rangle$ bei der versetzten Anordnung gegenüber der Reihenanordnung festgestellt. Weiterhin konnte erstmals die Anwendbarkeit des Verfahrens von LINDNER (1982) experimentell innerhalb der vorliegenden Versuchsrandbedingungen bestätigt werden. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Widerstandsbeiwerten konnte in Anbetracht der zahlreichen Annahmen die dem Verfahren zu Grunde liegen, als gut beurteilt werden. Aus den Ergebnissen wurde gefolgert, dass eine Veranschlagung des mittleren Widerstandsbeiwertes eines Bewuchsfeldes anhand des Widerstandsbeiwertes eines einzelnen Zylinders in einer ungestörten Strömung lediglich eine grobe Schätzung darstellt. Stattdessen ist die Anwendung des Verfahrens von LINDNER (1982) zu empfehlen.

In Bezug auf den Gesamtströmungswiderstand zeigten die Ergebnisse, dass die über einen Anordnungsfaktor P und die Dichte $1/(a_x a_y)$ normierte Gesamtschubspannungen aller Versuchsreihen mit den vollständig belaubten künstlichen Pappelzweigen in guter Näherung auf eine Linie fallen.

Die Untersuchungen zum Sohlenwiderstand ergaben, dass der Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung für die Versuche mit den voll belaubten künstlichen Pappelzweigen zwischen 5% und 25% liegt. Bei den starren Zylindern wurde ein Anteil zwischen 18% und 28% ermittelt. Der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand kann demnach nicht pauschal vernachlässigt werden. Unabhängig von der Vegetationsart wurden höhere Sohlenschubspannungen bei der Reihenanordnung als bei versetzter Anordnung gemessen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von CRAWLEY & NICKLING (2003) können unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit für die starre und die flexible Vegetation konstante und von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit unabhängige Anteile der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung angenommen werden.

In Abschnitt 5.2 wurde in einer Vergleichsmessung zwischen einer rauen und einer glatten Sohlenoberfläche ein eindeutiger Unterschied in der Höhe der berechneten Sohlenschubspannung und im Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung festgestellt. Die Messungen zeigten, dass der Einfluss der Sohlenrauheit auf die berechnete Sohlenschubspannung anhand des gewählten Versuchsaufbaus quantifiziert werden kann. Für die Ableitung einer Beziehung zwischen dem Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld und den Sohlen- und Vegetationseigenschaften sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, die eine höhere Bandbreite an Sohlen- und Vegetationseigenschaften abdecken.

In Abschnitt 5.3 wurde die Abhängigkeit zwischen der relativen Fließtiefe h/H und dem Sohlen- und Vegetationswiderstand für die höchste Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 15$ cm) mit den künstlichen Pappelzweigen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass der Vegetationswiderstand näherungsweise konstant über die Pflanzenhöhe verteilt ist. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass die Sohlenschubspannung mit steigender relativer Fließtiefe ansteigt und ihr Anteil an der Gesamtschubspannung entgegen den Beobachtungen von FENZL & DAVIS (1964) nicht mit steigender relativer Fließtiefe sinkt. Die Berücksichtigung der Sohlenschubspannung ist demnach nicht nur bei Strömungen mit geringer Wassertiefe von Bedeutung. Weitere Untersuchungen mit variabler relativer Fließtiefe sind zur Bestätigung dieser Aussagen erforderlich.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen zum Sohlen- und Vegetationswiderstand in Abhängigkeit der vertikalen Blattflächenverteilung in Abschnitt 5.4 zeigten, dass die Höhe der Sohlenschubspannung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der vertikalen Blattflächenverteilung ist. Die Variation der vertikalen Blattflächenverteilung wirkte sich für die vorliegenden Randbedingungen ($a_x = a_y = 20$ cm, versetzte Anordnung) nur geringfügig ($\pm 20\%$) auf das räumlich gemittelte Geschwindigkeitsprofil aus. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass der Abstand zwischen den stromlinienförmig ausgerichteten Elementen so groß war, dass diese über die gesamte Fließtiefe signifikant umströmt werden. Dadurch fand eine Strömungskonzentration in Ebenen, in welchen die Blätter entfernt wurden, nicht im erwarteten Umfang statt. Es zeigte sich, dass neben der Vegetationsstruktur die Vegetationsdichte und damit der Verbauungsgrad wesentlichen Einfluss auf das Geschwindigkeitsfeld haben. Aus den Ergebnissen wurde gefolgert, dass es fragwürdig erscheint, ob in der Natur die erforderliche Kombination aus der Pflanzenstruktur (sohlennah offene Bereiche) und einer hohen Vegetationsdichte vorkommen kann und der Einfluss der vertikalen

Blattflächenverteilung auf die Sohlenschubspannung weiterhin untersucht und berücksichtigt werden muss. Diese Fragestellung können in Versuchen, in welchen natürliche Dichten und Vegetationsstrukturen untersucht werden, abschließend beantworten.

Abschließend wurden in Abschnitt 5.5 die experimentell gewonnenen Versuchsergebnisse mit verschiedenen Ansätzen zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes im Bewuchsfeld verglichen. Eine Gegenüberstellung von experimentell bestimmten Widerstandskoeffizienten f' und über das logarithmische-Fließgesetz sowie über den Ansatz nach STRICKLER (1923) berechnete Werte zeigten, dass diese Ansätze nicht geeignet sind, den Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld zu bestimmen, da sie den Fließwiderstand der Sohlenoberfläche signifikant unterschätzen. Weiterhin werden die Auswirkungen der Pflanzendeformation und die Interaktion zwischen Pflanzenwiderstand, Sohlenwiderstand und dem sohlennahen Strömungsfeld in den Ansätzen nicht berücksichtigt.

Der Ansatz von RAUPACH (1992) wurde mit Versuchsdaten von flexiblen Vegetationselementen verglichen. Die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Ansatzes von RAUPACH (1992) mit den experimentell ermittelten Anteilen der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung zeigte, dass die experimentell gewonnen Ergebnisse durch den Ansatz von RAUPACH (1992) unterschätzt werden. Weiterhin zeigten die Ergebnisse in Übereinstimmung weiterer Autoren, dass entgegen der Theorie von RAUPACH (1992) die Sohlenschubspannungen für Vegetationsdichten zwischen $\lambda = 0,03-0,1$ nicht vernachlässigbar sind.

Die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Daten nach dem Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) zeigte eine sehr hohe Übereinstimmung für die Versuchsergebnisse mit den starren Zylindern. Für die flexiblen Pappelzweige überschätzte der Ansatz die gemessenen Werte durchgehend und signifikant. Die Anwendung des Ansatzes von TOLLNER ET AL. (1982) ist für starre Zylinderanordnungen zu empfehlen.

Den experimentell ermittelten Sohlenschubspannungen wurden weiterhin Schubspannungen gegenübergestellt, welche aus der turbulenten kinetischen Energie (TKE) des doppelt gemittelten turbulenten sohlennahen Strömungsfeldes bestimmt wurden. Obwohl teilweise hohe Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren festgestellt wurden, weisen die Ergebnisse eine vergleichbare Tendenz auf. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der beiden voneinander unabhängigen Methoden wurde gefolgert, dass die turbulente kinetische Energie des sohlennahen Strömungsfeldes für die Bestimmung der Sohlenschubspannungen geeignet ist. Aufgrund der geringen vertikalen Auflösung des Strömungsmessgerätes (ADV) mit einer Messvolumenhöhe von 9 mm wurde keine detaillierte Analyse des sohlennahen turbulenten Strömungsfeldes durchgeführt. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Methode zur Bestimmung der Sohlenschubspannung aus der turbulenten kinetischen Energie des sohlennahen Strömungsfeldes zu bestätigen und die Genauigkeit in der Ermittlung des räumlichen Mittelwertes des turbulenten Strömungsfeldes zu erhöhen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Stand der Forschung zum Sohlen- und Vegetationswiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern aus flexibler, belaubter Vegetation zu erweitern und zu einem besseren Verständnis des komplexen Widerstandsverhaltens von flexibler, belaubter Vegetation beizutragen. Im Vordergrund der Arbeit standen experimentelle Untersuchungen in einer Versuchsrinne des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, in denen systematisch die Vegetationsdichte, die Vegetationsanordnung, die Sohlenrauheit, die Fließtiefe und die Pflanzenstruktur variiert wurde, um den Anteil des Sohlen- und Vegetationswiderstandes am Gesamtfleißwiderstand in einem durchströmten Bewuchsfeld zu untersuchen und zu bestimmen.

In Anlehnung an das Klassifizierungskonzept von BÖLSCHER ET AL. (2005) und DITTRICH & ABERLE (2010) beziehen sich diese Untersuchungen auf „Vegetation großer Höhe“, also auf durchströmte baum- und buschartige Vegetation. Obwohl in diesem Teilbereich bis heute eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt worden sind, liegen bis heute keine universellen Ansätze vor, mit denen der Vegetationswiderstand flexibler belaubter Vegetation und der Sohlenwiderstand in einem Bewuchsfeld berechnet werden können. Dies ist unter anderem auf die enorme Bandbreite artspezifischer Vegetationseigenschaften, standortspezifischer Einflussfaktoren und der komplexen Interaktion zwischen Strömung und Vegetation zurückzuführen.

Systematische Untersuchungen zu dieser Thematik erfordern eine homogene Verteilung des Vegetationswiderstandes im Bewuchsfeld und über die gesamte Versuchsdauer konstante Vegetationseigenschaften. Um diese Randbedingungen einzuhalten, wurden natürliche flexible Vegetationselemente durch künstliche ersetzt. Da in der Literatur keine Hinweise hinsichtlich der Modellierung natürlicher Vegetationselemente gegeben sind, wurden Vergleichsmessungen zur Identifikation eines geeigneten künstlichen, flexiblen und belaubten Vegetationselementes durchgeführt. Die Auswahl der Elemente basierte auf dem Vergleich des Widerstandsverhaltens natürlicher und flexibler Elemente. Zu diesem Zweck wurde ein neues Kraftmesssystem entwickelt, welches die direkte Messung der Widerstandskräfte von Vegetationselementen mit einer hohen Genauigkeit ermöglichte, ohne das Strömungsfeld zu beeinflussen. Bei den entsprechenden Untersuchungen wurden die besten Übereinstimmungen zwischen einem künstlichen Pappelzweig und seinen natürlichen Gegenstücken festgestellt. Für den künstlichen Pappelzweig konnte eine empirische und pflanzenspezifische Gleichung zur Berechnung der Widerstandskraft in Abhängigkeit der einseitigen Blattfläche und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet werden. Für die natürliche als auch für die verwendete künstliche Vegetation wurde eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen der Widerstandskraft und der kumulativen einseitigen Blattfläche festgestellt. Diese Versuche zeigten, dass neben der Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Widerstandskraft und Strömungsgeschwindigkeit auch Untersuchungen zum Einfluss der Blattfläche auf die Widerstandskraft für die Auswahl von geeigneten künstlichen Vegetationselementen zu empfehlen sind.

Mit dem ausgewählten künstlichen Pappelzweig wurden anschließend die Hauptuntersuchungen zur Bestimmung des Sohlen- und Vegetationswiderstandes in Bewuchsfeldern durchgeführt. Hierzu

wurde der Versuchsstand um weitere Kraftmessgeräte erweitert, so dass erstmals die Widerstandskräfte von bis zu zehn Vegetationselementen gleichzeitig gemessen werden konnten. In einem ersten Schritt wurde die Abhängigkeit des Sohlen- und Vegetationswiderstandes von der Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 15, 20, 30 \text{ cm}$) und der Vegetationsanordnung (Reihenordnung und versetzte Anordnung) unter Normalabflussbedingungen und mit gerade überströmten Vegetationselementen untersucht. Zur besseren Vergleichbarkeit mit bereits bestehenden Arbeiten wurden zudem starre Zylinder mit einem Durchmesser $d = 1 \text{ cm}$ verwendet und Versuche für die mittlere Vegetationsdichte ($a_x = a_y = 20 \text{ cm}$) durchgeführt.

Unabhängig davon, ob in den Experimenten identische flexible oder starre Elemente verwendet wurden, wiesen die Widerstandskräfte der individuellen Vegetationselemente eine hohe räumliche Variabilität auf. Dieses Ergebnis verdeutlichte die Zweckmäßigkeit des gewählten Versuchsaufbaus, da die Messung der Widerstandskräfte eines einzelnen oder weniger Vegetationselemente im Bewuchsfeld offensichtlich zu einer signifikanten Fehleinschätzung der räumlich gemittelten Widerstandskraft führen kann.

In Bezug auf das Biegeverhalten, den Widerstandsbeiwert C_D , die angeströmte Fläche A_P und die Widerstandskraft F_D konnte ein vergleichbares Verhalten zwischen einem isolierten Einzelement in einer ungestörten Strömung und den räumlichen Mittelwerten von flexiblen Pappelzweigen im Bewuchsfeld festgestellt werden. Zudem zeigte sich, dass die räumlich gemittelte Widerstandskraft für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten unabhängig von der Vegetationsdichte war. Hieraus ergab sich die Schlussfolgerung, dass sich die flexiblen Pappelzweige im Bewuchsfeld für die untersuchten Dichten (11, 25 und 44 Pflanzen pro m^2) und Anordnungen nicht gegenseitig beeinflussten und dass, unter diesen Bedingungen, das Widerstandsverhalten des künstlichen Einzelementes in einer ungestörten Strömung auf das räumlich gemittelte Widerstandsverhalten in einem Bewuchsfeld übertragen werden kann. Es wurde weiterhin festgestellt, dass der Einfluss der Anordnung unter den gegebenen Randbedingungen vereinfachend durch einen konstanten Faktor berücksichtigt werden kann und die Anordnung in Widerstandsfunktionen berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund der relativ lichten Bewuchsdichten konnte nicht geklärt werden, ab welcher Vegetationsdichte in Kombination mit welchen weiteren Kriterien bezüglich der Vegetationsstruktur, eine gegenseitige Beeinflussung der Vegetationselemente stattfindet und wie sich diese auf das räumlich gemittelte Widerstandsverhalten im Bewuchsfeld im Vergleich zum isolierten Einzelement in einer unbeeinflussten Strömung auswirkt. Diese Fragestellung bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten, in denen auch untersucht werden sollte, unter welchen Bedingungen der Einfluss der Anordnung auf die mittlere Widerstandskraft vernachlässigt werden kann.

Anhand von Vergleichsmessungen mit starren Zylindern konnte der Ansatz von LINDNER (1982) zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in einem regelmäßigen Feld von umströmten Zylindern erstmals experimentell bestätigt werden. Die Anwendung des Verfahrens ist zu empfehlen, wenn keine direkte Bestimmung des Widerstandsbeiwertes möglich ist.

Die Ergebnisse zum Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld zeigten, dass der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand nicht pauschal vernachlässigt werden kann. Für die Versuchsreihen mit variabler Dichte und Anordnung betrug der Anteil des Sohlwiderstandes am Gesamtwiderstand zwischen 5% und 25% mit den künstlichen Pappelzweigen und zwischen 18% und 28% mit den starren Zylindern. Unabhängig von der Vegetationsart wurden höhere Sohlenschubspannungen bei der Reihenanordnung als bei versetzter Anordnung ermittelt. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von CRAWLEY & NICKLING (2003) kann unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit für die starre und die flexible Vegetation ein konstanter und von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit unabhängiger Anteil der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung angenommen werden.

In einer weiteren Versuchsreihe mit einer veränderlichen relativen Fließtiefe h/H konnte festgestellt werden, dass der Vegetationswiderstand näherungsweise konstant über die Höhe der flexiblen Pappelzweige verteilt ist. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass die Sohlenschubspannung mit steigender relativer Fließtiefe ansteigt und ihr Anteil an der Gesamtschubspannung entgegen den Beobachtungen von FENZL & DAVIS (1964) nicht mit steigender relativer Fließtiefe sinkt. Daraus ergab sich die Schlussfolgerung, dass die Berücksichtigung der Sohlenschubspannung nicht nur bei Strömungen mit geringer Fließtiefe von Bedeutung ist, wie FISCHENICH (1996) aus den Untersuchungen von FENZL & DAVIS (1964) folgerte. Weitere Untersuchungen mit variabler relativer Fließtiefe sind zur Bestätigung dieser Aussagen allerdings wünschenswert.

In der Literatur wird oftmals darauf aufmerksam gemacht, dass die Pflanzenstruktur mit sohlennahen offenen Bereichen zu einer sohlennahen Strömungskonzentration in Verbindung mit einer Erhöhung der Sohlenschubspannungen führt. Um diesen Sachverhalt näher zu untersuchen, wurde die vertikale Blattflächenverteilung der künstlichen Elemente systematisch variiert. Die entsprechenden Ergebnisse zeigten, dass für die vorliegenden Versuchsrandbedingungen eine Strömungskonzentration in Ebenen, in welchen die Blätter entfernt wurden, nicht im erwarteten Umfang stattfand und dass die Variation der vertikalen Blattflächenverteilung für vergleichbare mittlere Strömungsgeschwindigkeiten keine Auswirkung auf die Höhe der Sohlenschubspannung hatte. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass der Abstand zwischen den stromlinienförmig ausgerichteten Elementen so groß war, dass diese noch über die gesamte Fließtiefe umströmt werden konnten und es nicht zur Ablenkung der Hauptströmung in Richtung der Sohle kam. Deshalb sollte in weiteren interdisziplinären Forschungsarbeiten der Fragestellung nachgegangen werden, ob in der Natur die notwendigen Bedingungen aus einer hohen Vegetationsdichte und einer geeigneten Vegetationsstruktur überhaupt vorkommen können, damit eine signifikante Strömungskonzentration in sohlennahen Bereichen stattfinden kann.

In einem weiteren Vergleich wurden die experimentell ermittelten Sohlenschubspannungen den Schubspannungen gegenübergestellt, welche aus der turbulenten kinetischen Energie (TKE) des doppelt gemittelten sohlennahen Strömungsfeldes bestimmt wurden. Obwohl teilweise hohe Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren vorlagen, wurde unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der beiden Verfahren gefolgert, dass die turbulente kinetische Energie

des sohlennahen Strömungsfeldes für die Bestimmung der Sohlenschubspannungen im Bewuchsfeld geeignet ist. Es sind jedoch weitere Untersuchungen zur Charakterisierung des sohlennahen turbulenten Strömungsfeldes erforderlich, die eine höhere vertikale Auflösung des Strömungsfeldes beinhalten und eine höhere Genauigkeit in der Ermittlung eines repräsentativen räumlichen Mittelwertes erzielen als die vorliegenden Ergebnisse.

Da in den Untersuchungen festgestellt wurde, dass der Anteil des Sohlenwiderstandes am Gesamtwiderstand nicht vernachlässigbar ist, wurden Vergleichsmessungen mit einer rauen und einer glatten Sohlenoberfläche durchgeführt. Hierbei wurde ein eindeutiger Unterschied zwischen der glatten und rauen Sohle hinsichtlich der Sohlenschubspannung und bezüglich des Anteils der Sohlenschubspannung an der Gesamtschubspannung festgestellt. Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit bestehenden Ansätzen zur Ermittlung des Sohlen- und Vegetationswiderstand in einem Bewuchsfeld verdeutlichte, dass die Ansätze von STRICKLER (1923) und RAUPACH (1992) sowie das logarithmische Fließgesetz nicht zur Bestimmung des Sohlenwiderstandes in einem Bewuchsfeld geeignet sind, da sie den Sohlenwiderstand signifikant unterschätzen. Zudem werden die Auswirkungen der Pflanzendeformation und die Interaktion zwischen Pflanzenwiderstand, Sohlenwiderstand und dem sohlennahen Strömungsfeld durch die Ansätze nicht erfasst. Der Ansatz von TOLLNER ET AL. (1982) zeigte hingegen eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen für die starren Zylinder. Für die Bestimmung der Sohlenschubspannung in Bewuchsfeldern aus flexibler Vegetation ist der Ansatz jedoch nicht geeignet.

Obwohl umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden, wurde davon abgesehen eine spezifische Beziehung zwischen dem Sohlenwiderstand, hydraulischen Parametern und den Sohlen- und Vegetationseigenschaften abzuleiten. Für die Entwicklung einer allgemeingültigeren Beziehung zwischen dem Sohlenwiderstand im Bewuchsfeld und den Sohlen- und Vegetationseigenschaften sind Untersuchungen erforderlich, in denen eine weiterführende Variation der Sohlen- und Vegetationseigenschaften durchgeführt wird.

Im Hinblick auf den Vegetationswiderstand verdeutlichte die Literaturrecherche, dass trotz intensiver Bemühungen, den Vegetationswiderstand und das Widerstandsverhalten natürlicher flexibler belaubter Vegetation mittels Vegetationseigenschaften zu parametrisieren, es bislang noch nicht gelungen ist, eine allgemeingültige Widerstandsbeziehung zu entwickeln. Es ist weiterhin unklar, wie die Flexibilität in Widerstandsfunktionen über Vegetationseigenschaften parametrisiert werden kann. Unbestritten ist jedoch, dass das Laub den Vegetationswiderstand um ein Vielfaches erhöhen kann. JÄRVELÄ (2004) führte diesbezüglich erstmals den Blattflächenindex LAI in eine Widerstandsfunktion ein. WILSON ET AL. (2008) stellten zudem ein konstantes Verhältnis der Widerstandskräfte an einem Efeuzweig im be- und entlaubten Zustand für vergleichbare Strömungsgeschwindigkeiten fest. Dieses Ergebnis wurde in der vorliegenden Arbeit mit Büschen und Bäumen anhand von Kraftmessungen in einem Schleppkanal überprüft. Es stellte sich heraus, dass ein konstantes Verhältnis der Widerstandskräfte im be- und entlaubten Zustand näherungsweise erreicht wird, wenn die Blätter vollständig stromlinienförmig ausgerichtet sind. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die hier untersuchten Weiden und Erlen in der Wachstumsphase

des Laubes getestet worden sind und die Belaubung nicht vollständig ausgebildet war. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass der Einfluss des Laubes mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt und im Bereich sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten (bis 0,25 m/s), einen höheren Beitrag zur Widerstandskraft leisten kann als die Äste.

Die in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten Versuchseinrichtungen stellen bereits heute die Grundlage für weiterführende Untersuchungen mit natürlichen Pappelzweigen im Bewuchsfeld (VÄSTILLÄ ET AL. 2011, Kooperation mit der Aalto University, Finnland) und Vegetationsmustern mit den künstlichen Pappelzweigen (Kooperation mit der Universität Aberdeen), sowie aquatischer Vegetation (Kooperation mit dem Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin) dar. Weiterhin stellen die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse eine solide Basis dar, um in weiteren Untersuchungen Widerstandsbeziehungen mit Vegetationsparametern ableiten zu können. In diesem Zusammenhang bestätigten die Versuchsergebnisse, dass der Einfluss des Laubes durch den Blattflächenindex LAI erfolgen kann. Ein entscheidender Vorteil des Blattflächenindex ist es, dass dieser durch Fernerkundungsmaßnahmen bestimmt werden kann. Weiterhin ist es empfehlenswert, allometrische Beziehungen in die Entwicklung von Widerstandsbeziehungen einzubinden. Diese ermöglichen es, den Bezug zwischen der Größe eines Körpers und verschiedensten biologischen Parametern herzustellen. Vielversprechend erscheint dabei beispielsweise, eine pflanzenspezifische Beziehung zwischen der Blattmasse oder der Blattfläche und der Holzmasse bzw. dem Astdurchmesser zu entwickeln. Vergleichbares ist im Hinblick auf die Berücksichtigung der Flexibilität denkbar.

Abschließend kann festgehalten werden, dass es nach wie vor wichtig ist, Strömungskräfte auf Vegetation experimentell zu bestimmen, die Mechanismen zu untersuchen, die zu einer Minimierung der Strömungskräfte führen und diese mit den biomechanischen Eigenschaften der Pflanzen in Verbindung zu bringen. Im Vergleich zu den zahlreichen Forschungsarbeiten die innerhalb der einzelnen Fachgebieten zur Baumstatik, Pflanzenallometrie und zum Widerstandsverhalten von Vegetation gegenüber aerodynamischen und hydrodynamischen Strömungskräften durchgeführt worden sind, existieren bislang nur ansatzweise Versuche fächerübergreifende Studien durchzuführen. Dabei ist es wünschenswert und erforderlich fachübergreifende Studien zwischen Ingenieuren und Biologen zum Widerstandsverhalten von Vegetation durchzuführen, die eine Parametrisierung des Widerstandsverhaltens von natürlicher Vegetation zum Ziel haben.

7 Literaturverzeichnis

- Aberle, J., Järvelä, J., Schoneboom, T. & Dittrich, A. (2010a). "Flow resistance of rigid and flexible emergent vegetation revisited." 1st European IAHR Congress, 4-6 Mai 2010, Edinburgh, UK.
- Aberle, J., Järvelä, J., Schoneboom, T. & Dittrich, A. (2010b). "Widerstandsverhalten von Vegetation in Fließgewässern." In Lüderitz, V., Jüpner, R., Dittrich, A. (Hrsg.), Beiträge zum Instituts-kolloquium "Auswirkungen von Eingriffen in Fließgewässern.", Magdeburg, 18. November 2010, Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte, Band 10, pp. 87-102, Shaker Verlag.
- Albayrak, I., Nikora, V., Miler, O. (2010). „Flow-plant interaction at a leaf scale: effects of leaf shape and flexural rigidity.“ *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2010*, 8-10 September 2010, Braunschweig, Deutschland.
- Antonarakis, A.S., Richards, K.S., Brasington, J., Bithell, M. (2009). "Leafless roughness of complex tree morphology using terrestrial lidar." *Water Resour. Res.*, 45, W10401, doi:10.1029/2008WR007666.
- Antonarakis, A.S., Richards, K.S., Brasington, J., Muller, E. (2010). "Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning." *Water Resour. Res.*, 46, W06510, doi:10.1029/2009WR008318.
- Armanini, A., Righetti, M., and Grisenti, P. (2005). "Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale." *J. Hydraul. Res.*, 43(5), 481–487.
- Armanini, A., Righetti, M., and Grisenti, P. (2009). "Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale." *Closure, J. Hydraul. Res.*, 47(3), 384-385.
- Baptist, M. (2005). "Modelling floodplain biogeomorphology." PhD thesis. Delft, Technical University of Delft.
- Bartelink, H.H. (1997). "Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L)". *Ann. Sci. For.* 54, 39-50.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. (2000). Random data: analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons, New York.
- Bertram, H.U. (1985). "Über den Abfluss in Trapezgerinnen mit extremer Böschungsrauheit." Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 86.
- Bertram, J.E.A. (1989). "Size-dependent differential scaling in branches: the mechanical design of trees revisited." *Trees* 4, 241-253.
- Biron, P.M., Robson, C., Lapointe, M.F., Gaskin, S.J. (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields." *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 1403-1415.
- Bölscher, J., Ergenzinger, P., Obenauf, P.-J. (2005). Hydraulic, Sedimentological and Ecological Problems of Multi-functional Riparian Forest Management -RIPFOR- The Scientific Report, Heft 65, Berliner Geographische Abhandlungen.
- Brown, S., Nickling, W.G., Gilles, J.A. (2008). "A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions." *J. Geophys. Res.*, 113, F02S06, doi:10.1029/2007JF000790.

- Callaghan, F.M., Cooper, G.G., Nikora, V. I., Lamoroux, N., Statzner, B., Sagnes, P., Radford, J., Malet, E., and Biggs, B.J.F. (2007). "A submersible device for measuring drag forces on aquatic plants and other organisms." *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 41, 119–127.
- Carollo, F.G., Ferro, V., Termini, D. (2002). "Flow velocity measurements in vegetated channels." *J. Hydraul. Eng.* ASCE 127(7), 664–673.
- Chen, S.-S. (1985). "Flow-induced vibration of circular cylindrical structures." Report ANL-85-51 Argonne National Laboratory, Illinois, USA.
- Christensen, B.A. (1985). "Open channel and sheet flow over flexible roughness." *Proceedings of the 21st IAHR Congress Melbourne*, Australia, 462–467.
- Cooper, G. G., Callaghan, F. M., Nikora, V. I., Lamoroux, N., Statzner, B., and Sagnes, P. (2007). "Effects of flume characteristics on the assessment of drag on flexible macrophytes and a rigid cylinder." *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 41, 129–135.
- Crawley, D.M., Nickling, W.G. (2003). "Drag partition for regularly-arrayed rough surfaces." *Boundary-Layer Meteorology* 107: 445–468.
- Cullen, S. (2002). "Trees and wind: A Bibliography for tree care professionals." *Journal of Arboriculture* 28(1): 41–51.
- Dittrich, A. (1998). "Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer." Mitt. des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe (TH), Heft 198.
- Dittrich, A., Aberle, J. (2010). „Die Vegetation an Fließgewässern aus dem Blickwinkel eines Hydraulikers." *Ingenieurbiologie / Genie Biologique* 3(2010), 37–42.
- Dittrich, A., Järvelä, J. (2005). „Flow-vegetation-sediment interaction." *Water Engineering Research* 6(3), 123–130.
- Düsterhöft, I. (2010). "Untersuchung des Einflusses von Belaubung auf die hydrodynamischen Widerstandskräfte von natürlicher Vegetation." Studienarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, unveröffentlicht.
- Dunn, C., Lopez, F., Garcia, M. (1996). "Mean flow and turbulence in a laboratory channel with simulated vegetation." In: Hydrosystems Laboratory Hydraulic Engineering Series 51, UIUL-ENG-96-2009, University of Illinois, Urbana (1996) 148 pp.
- DVWK (1991). „Hydraulische Berechnung von Fließgewässern." DVWK-Merkblätter, Heft 220.
- Einstein, H. A., Banks, R.B. (1950). "Fluid resistance of composite roughness." *Transactions of the American Geophysical Union* 31(4), 1950.
- Enquist, B.J., Niklas, K.J. (2002). „Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants." *Science* 295: 1517–1520.
- Ennos, A.R. (1999). "The aerodynamics and hydrodynamics of plants." *Journal of Experimental Biology* 202, 3281–3284.
- Fathi-Moghadam, M., (1996). "Momentum absorption in non-rigid, non-submerged, tall vegetation along rivers." PhD Thesis, university of Waterloo, Waterloo, Canada.
- Fathi-Moghadam, M., and Kouwen, N. (1997). "Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains." *J. Hydraul. Eng.* 123(1), 51–57.

- Fenzl, R.N. and Davis, J.R. (1964). "Hydraulic resistance relationships for surface flows in vegetated channels." *Trans. ASAE* 7: 46–55.
- Finnigan, J.J. (1985). "Turbulent transport in flexible plant canopies." *The forest atmosphere interactions*, B.A. Hutchinson and B.B. Hicks, eds., Reidel, Dordrecht, The Netherlands, pp. 443–480.
- Fischenich, J.C. (1996). „Velocity and resistance in densely vegetated floodways.“ Ph.D. diss., Colorado State University, University Press, Fort Collins, CO.
- Fischenich, J.C. (2000). "Resistance due to vegetation." EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-07), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Fraser, A.I. (1962). "Wind tunnel studies of the forces acting on the crowns of small trees." Annual Research Report of the Forestry Commission, United Kingdom, pp 179–183.
- Freeman, G., Rahmeyer, W., and Copeland, R.R. (2000). "Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation." ERDC/ CHL TR- 00- 25, US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Centre, Vicksburg.
- Freeman, G. E., Rahmeyer, W. H. and Copeland, R. R. (2002). "Development and Application of Methodology for Determination of Hydraulic Roughness for Vegetated Floodplains." *ASCE Conf. Proc.* 113, 88 (2002), DOI:10.1061/40655(2002)88.
- Ghisalberti, M., Nepf, H.M. (2004). "The limited growth of vegetated shear layers". *Water Resour. Res.*, 40, W07502, doi:10.1029/2003WR002776.
- Gillette D.A., Stockton, P.H. (1989). "The effect of non-erodible particles on wind erosion of erodible surfaces." *Journal of Geophysical Research* 94: 12885–12893.
- Gillies, A., Nickling, W.G., King, K. (2007). "Shear stress partitioning in large patches of roughness in the atmospheric inertial sublayer." *Boundary- Layer Meteorology* 122: 367–396.
- Grant, R.H. (1984). "The mutual interference of spruce canopy structural elements." *Agricultural and Forest Meteorology*, 32(1984), 145–156.
- Grant, P.F., Nickling, W.G. (1998). "Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling." *Land degradation & Development* Volume 9 Issue 1, 57–66
- Harder, D.L., Speck, O., Hurd, C.L., Speck, T. (2004). "Reconfiguration as a prerequisite for survival in highly unstable flow-dominated habitats." *J. Plant Growth Regul.* 23:98–107.
- Hoerner, S. (1965). Fluid-Dynamic Drag, Hoerner, S., Brick Town.
- Hoffmann, K. (1987). Eine Einführung in die Messung mit Dehnungsmessstreifen. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Deutschland.
- Huai, W., Chen, Z. Han, J. (2009). Mathematical model for the flow with submerged and emerged rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics* 21 (5): 722–729.
- Huthoff, F. (2007). "Modeling hydraulic resistance of floodplain vegetation." Dissertation Universität Twente, Niederlande. ISBN978-90-365-2553-4.

- Huthnance JM, Humphery JD, Knight PJ, Chatwin PG, Thomsen L, White M. (2002). "Near-bed turbulence measurements, stress estimates and sediment mobility at the continental shelf edge." *Progress in Oceanography* 52(2-4): 171-194.
- Ishikawa, H., Amano, S., Yakushiji, K. (2006). Flow around a living tree, *JSME Int. J., Ser.B*, 49(4), 1064-1069, doi:10.1299/jsmeb.49.1064.
- Järvelä, J. (2002). "Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants." *Journal of Hydrology*, 269(1-2), 44-54.
- Järvelä, J. (2002). "Determination of flow resistance of vegetated channel banks and floodplains." Bousmar, D. and Zech, Y. (eds.) 2002. *River Flow 2002*. Swets & Zeitlinger, Lisse. p. 311-318.
- Järvelä, J. (2004). "Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation." *Int. J. River Basin Manag.* 2(1), 61-70.
- Järvelä, J. (2006). "Vegetative flow resistance: characterization of woody plants for modeling applications." Järvelä, J. 2006. In: R. Graham (ed), *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2006*.
- Järvelä, J., Aberle, J., Dittrich, A., Rauch, H.-P., Schnauder, I. (2006). Flow-vegetation-sediment interaction: Research challenges. *Proc. River Flow 2006*, 2017-2026.
- James, C.S., Birkhead, A.L., Jordanova, A.A., Kotschy, K.A., Nicolson, C.R., Makoa, M.J., (2001). "Interaction of reeds, hydraulics and river morphology." *Water Research Commission Report No. 856/1/01*, Pretoria.
- James, C. S., Birkhead, A. L., Jordanova, A. A., O'Sullivan, J. J. (2004). "Flow resistance of emergent vegetation." *J. Hydraul. Res.* 42(4), 390-398.
- James, C. S., Goldbeck, U. K., Patini, A., and Jordanova, A. A. (2008). "Influence of foliage on flow resistance of emergent vegetation." *J. Hydraul. Res.*, 46(4), 536-542.
- Jordanova, A.A., James, C.S. (2003). "Experimental study of bed load transport through emergent vegetation." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 129, No. 6, 474-478.
- Kaiser, W. (1984). "Fließwiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchströmten Ufergehölzen." *Wasserbau-Mitteilungen* 23, Institut für Wasserbau, konstruktiven Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Darmstadt.
- Kane, B., Smiley, E.T. (2006): "Drag coefficients and crown area estimation of red maple." *Can. J. For. Res.* 36: 1951-1958.
- Kane, B., Pavlis, M., Harris, J.R., Seiler, J.R. (2008): "Crown reconfiguration and trunk stress in deciduous trees." *Can. J. Forest Res.* 38 (6):1275-1289.
- Katul, G.G., Wiberg, P., Albertson, J.D., Hornberger, G.W. (2002). A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams. *Water Resour. Res.* 38(11), art. no. 1250.
- Keil, S. (1995). Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen. Cuneus Verlag. ISBN: 3-9804188-0-4.
- Kim S-C, Friedrichs CT, Maa JP-Y, Wright LD. (2000). "Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 126(6): 399-406.

- King J., Nickling, W.G., Gillies, J.A. (2008). „Investigations of the law-of-the-wall over sparse roughness elements.” *Journal of Geophysical Research* 113: F02S07, doi: 10.1029/2007JF000804.
- Kothyari, U.C., Hayashi, K., Hashimoto, H. (2009a). Drag coefficient of unsubmerged rigid vegetation stems in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research* Vol.47, No.6, 691-699.
- Kothyari, U.C., Hashimoto, H., Hayashi, K. (2009b). Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows. *Journal of Hydraulic Research* Vol.47, No.6, 700-710.
- Kouwen, N., Unny, T.E., Hill, H.M. (1969). Flow retardance in vegetated channels. *J. Irrigation and drainage division ASCE* 95, IR2, 329-342.
- Kouwen, N., Fathi-Moghadam, M. (2000). "Friction factors for coniferous trees along rivers." *J. Hydraul. Eng.* 126(10), 732-740.
- Kutija, V., and Hong, H. T. M. (1996). “A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation.” *J. Hydraul. Res.*, 34(1), 99–114.
- Lancaster, N., Baas, A. (1998). “Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California.” *Earth surf. process. landforms*, 23, 69-82.
- Li, R.-M. Shen, H.W. (1973). "Effect of tall vegetations on flow and sediment." *J. Hydr. Div.* 99(5): 793–814.
- Lindner, K. (1982). "Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen." *Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig*, Heft 75.
- Liu, D., Diplas, P., Hodges, C.C., Fairbanks, J.D. (2009). “Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation.” *Geomorphology* 116 (2010) 286-296.
- Lyles L, Allison BE. (1975). “Wind erosion: The protective role of simulated standing stubble.” *American Society of Agricultural Engineering* 19(1): 61–64.
- Manes, C., Pokrajac, D., Coceal, O., McEwan, I. (2008). “On the significance of form-induced/dispersive stress in rough wall turbulent boundary layers.” *Acta Geophysica* SI, 56(3): 845-861. DOI: 10.2478/s11600-008-0021-2
- Marshall, J.K. (1971). “Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution.” *Agr. Meteorol.*, 8 (1971), 269-292.
- McKenna Neuman C., Nickling WG. (1995). „Aeolian sediment flux decay: Nonlinear behaviour on developing deflation lag surfaces.” *Earth Surface Processes and Landforms* 20: 423–435.
- McMahon, T.A., Kronauer, R.E. (1976). „Tree structures: Deducing the principle of mechanical design.” *Journal of Theoretical Biology* 59(2): 443-66.
- Mertens, W. (2006). "Hydraulisch-sedimentologische Berechnungen naturnah gestalteter Fließgewässer." DWA, Hennef, Deutschland.
- Musick HB, Gillette DA. (1990). “Field evaluation of relationships between a vegetated structural parameter and sheltering against wind erosion.” *Land Degradation and Rehabilitation* 2: 87–94.
- Musleh, F.A., Cruise, J.F. (2006). “Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 132, No. 2, 163-171

- Nepf, H. M. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resour. Res.* 35(2), 479-489.
- Niklas, K.J. (1999). „A mechanical perspective on foliage leaf form and function.“ *New Phytol.* 143: 19-31.
- Nikora V, Goring D. (2000). "Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 126(9): 679–690.
- Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., Dittrich, A. (2004). "Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows." *J. Hydraul. Eng.* 130(10), 1036-1042.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., and Walters, R. (2007a). "Double-Averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical Background." *J. Hydraul. Eng.*, 133(8), 873-883.
- Nikora, V., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D., and Koll, K. (2007b). "Double-Averaging concept for rough-bed openchannel and overland flows: Applications." *J. Hydraul. Eng.*, 133(8), 884-895.
- Oplatka, M. (1998): „Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern.“ Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Nr. 156. Zürich.
- Pasche, E. (1984). "Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung." *Mitteilungen 52, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Aachen.*
- Pasche, E., Rouvé, G. (1985). "Overbank flow with vegetatively roughened flood plains." *J. Hydraul. Eng.* 111(9), 1262-1278.
- Petryk, S. (1969). "Drag on cylinders in open channel flow." Diss. Colorado State University, Fort Collins, Dec. 1969.
- Petryk, S., and Bosmajian, G. (1975). "Analysis of flow through vegetation." *J. Hydraul. Div.*, 101(7), 871-884.
- Poggi, D., Porporato, A., Ridolfi, L., Albertson, J.D., Katul, G.G. (2004). "The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence." *Boundary-Layer Meteorology* 111 (565-587).
- Pokrajac, D., Finnigan, J.J., Manes, C., McEwan, I., Nikora, V. (2006). „On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows.“ Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2006.
- Pretzsch, H. (2000). "Die Regeln von Reineke, Yoda und das Gesetz der räumlichen Allometrie.“ *AFJZ* 171(11): 205-210.
- Pretzsch, H. (2010). "Re-Evaluation of allometry: State-of-the-art and perspective regarding individuals and stands of woody plants." *Progress in Botany* 71: 339-369.
- Pretzsch, H., Mette, T. (2008). "Linking stand-level self-thinning allometry to the tree-level leaf biomass allometry." *Trees* 22: 611-622.
- Raupach, M.R. (1992). "Drag and drag partition on rough surfaces." *Boundary-Layer Meteorology* 60: 375-395.
- Raupach, M.R., Shaw, R.H. (1982). "Averaging procedures for flow within vegetation canopies." *Boundary-Layer Meteorology*, 22: 79-90.

- Raupach, M.R., Antonia, R.A., Rajagopalan, S. (1991). "Rough-wall turbulent boundary layers." *Applied Mech. Rev.* 44: 1-24.
- Raupach, M.R., Gillette, D.A., Leys, J.F. (1993). „The effect of roughness elements on wind erosion threshold." *Journal of Geophysical Research* 98: 3023–3029.
- Raupach, M.R., Finnigan, J.J., Brunet, Y. (1996). "Coherent eddies and turbulence in vegetated canopies: The mixing layer analogy." *Bound.-Layer Meteor.* 78, 351-382.
- Reichardt, H. (1941). „Über eine neue Theorie der freien Turbulenz." *ZAMM* 21, 257
- Reineke, L. H. (1933). "Perfecting a stand-density index for even-aged forests". *Journal of Agricultural Research* 46(7), 627-638.
- Rhee, D. S., Woo, H., Kwon, B. A., and Ahn, H. K. (2008). "Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows." *River Research and Applications*, 24, 673-687.
- Richter, A. (1973). „Strömungskräfte auf starre Kreiszylinder zwischen parallelen Wänden" Karlsruhe, Univ., Fak. f. Bauingenieur- u. Vermessungswesen, Diss. 1973.
- Rickert, K. (1986). "Der Einfluss von Gehölzen auf die Lichtverhältnisse und das Abflussverhalten in Fließgewässern." *Mitteilungen* 61, Inst. für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover.
- Righetti, M. (2008). "Flow analysis in a channel with flexible vegetation." *Acta Geophysica* 56(3), 801 - 823.
- Righetti, M., Armanini, A. (2002). Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes. *J. Hydrol.* 269, 55-64.
- Rowiński, P.M., Kubrak, J. (2002). "A mixing-length model for predicting vertical velocity distribution in flows through emergent vegetation", *Hydrol. Sci. J.* 46 (6), pp. 893-904.
- Rowinski, P.M., Aberle, J., Mazurczyk, A. (2005). Shear velocity estimation in hydraulic research. *Acta Geophysica Polonica* Vol. 53, no. 4, 457-583.
- Rudnicki, M., Mitchell, S.J., and Novak, M.D. (2004). "Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species." *Can. J. For. Res.* 34: 666–676.
- Sagnes, P. (2010). „Using multiple scales to estimate the projected frontal surface area of complex three-dimensional shapes such as flexible freshwater macrophytes at different flow conditions." *Limnol. Oceanogr.: Methods* 8, 2010, 474-483.
- Schlichting, H. (1936). "Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem." *Ing. Arch.*, 7, 1-34.
- Schlichting, H., Gersten, K. (2006). *Grenzschicht-Theorie*. 10., überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schnauder, I. (2004). "Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation." *Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Mitteilungen* 224.
- Schoneboom, T.; Aberle, J.; Wilson, C.A.M.E.; Dittrich, A. (2008): "Drag force measurements of vegetation elements." *ICHE 2008, Nagoya, Japan, Papers on CD-ROM*.
- Schoneboom, T., Aberle, J. (2009). "Influence of foliage on drag force of flexible vegetation." *33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada. Papers on CD-ROM*.

- Schoneboom, T., Aberle, J., Dittrich, A. (2010a). "Direkte Kraftmessung von flexiblen Pflanzenelementen." Dresdner Wasserbaukolloquium, 55-64, Dresden, Deutschland.
- Schoneboom, T., Aberle, J., Dittrich, A. (2010b). "Hydraulic resistance of vegetated flows: Contribution of bed shear stress and vegetative drag to total hydraulic resistance." Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, 8-10 September 2010, Braunschweig, Germany. Edited by A. Dittrich, Ka. Koll, J. Aberle & P. Geisenhainer, BAW, pp. 269-276.
- Schoneboom, T., Aberle, J., Dittrich, A. (2010c). "Spatial variability, mean drag forces, and drag coefficients in an array of rigid cylinders. " *Experimental Methods in Hydraulic Research, Geoplanet: Earth and Planetary Sciences*, Volume 1, 255-265, doi: 10.1007/978-3-642-17475-9_18.
- Sinn, G. (2003). "Baumstatik: Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft; biologische Aspekte und eine Einführung in die Baumstatik unter besonderer Berücksichtigung der Neigungs- und Dehnungsmessverfahren." ISBN 3-87815-200-0, Thalacker Medien, Deutschland.
- Smiley, E.T., Kane, B. (2006). "The effects of pruning type on wind loading of *Acer Rubrum*." *Arboriculture & Urban Forestry* 32(1): 33-40.
- Soulsby R.L. (1983). „The bottom boundary-layer in shelf seas.“ *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Areas*. Johns B (ed.) Elsevier: Amsterdam. 189-266.
- Specht, F.-J. (2002). "Einfluß von Gerinnebreite und Uferbewuchs auf die hydraulischsedimentologischen Verhältnisse naturnaher Fließgewässer." *Mitteilungen Leichtweiss- Instituts für Wasserbau*, TU Braunschweig, Heft 153.
- Speck, O. (2003). "Field measurements of wind speed and reconfiguration in *Arundo Donax* (Poaceae) with estimates of drag forces." *American Journal of Botany* 90(8): 1253-1256.
- Statzner, B., Lamoroux, N., Nikora, V., and Sagnes, P. (2006). "The debate about drag and reconfiguration of freshwater macrophytes: comparing results obtained by three recently discussed approaches." *Freshwat. Biol.*, 51, 2173-2183.
- Stephan, U., Gutknecht, D. (2002). "Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation." *J. Hydrol.* 269, 27-43.
- Stockton, P.H., Gillette, D.A. (1990). "Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces." *Land degradation & rehabilitation*, Vol.2, 77-85.
- Stone, B. M., Shen, H. T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *J. Hydraul. Eng.* 128(5), 500-506.
- Strahler, A.N. (1952). "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography", *Bull. Geolog. Soc. Amer.*, 63, 1117–1142.
- Strickler, A. (1923). „Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen.“ *Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft* 16, Eidg. Department des Innern, Bern, Schweiz.
- Sumer, M., Fredsøe, J. (2006). Hydrodynamics around cylindrical structures." *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 26. ISBN 978-981-270-039-1. World Scientific.

- Thompson, A.M., Wilson, B.N. (2002). The impact of roughness elements on reducing the shear stress acting on soil particles. Technical Report No. MN/RC – 2002-22. Minnesota Department of Transportation.
- Thompson, A.M., Wilson, B.N., Hustrulid, T. (2003). Instrumentation to measure drag on idealized vegetal elements in overland flow. *Transactions of the ASAE* Vol. 46(2): 295-302.
- Thompson, A.M., Wilson, B.N., Hansen, B.J. (2004). "Shear stress partitioning for idealized vegetated surfaces." *Transactions of the ASABE*, Vol. 47(3): 701-709.
- Tollner, E.W., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vegetal filters." *J. Hydraulics Div., ASCE* 108(HY12).
- Turpin, C., Badr, T., Harion, J.-L. (2010). Numerical modelling of Aeolian erosion over rough surfaces. *Earth Surf. Process. Landforms*, doi:10.1002/esp.1980.
- Västilä, K., Järvelä, J., Aberle, J. Schoneboom, T. (2011). "Vegetative drag in natural, foliated plant stands." Proc. 34rd IAHR Congress, 26 June - 1 July 2011, Brisbane, Australien, pp. 2978 - 2985, ISBN 978-0-85825-868-6.
- Vogel, S. (1984). "Drag and flexibility in sessile organisms." *Amer. Zool.*, 24: 37-44.
- Vogel, S. (1989). "Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds." *J. Exper. Bot.* 40: 941–948.
- Vogel, S. (1994). *Life in moving fluids: the physical biology of flow*. 2nd edition. Princeton, Princeton University Press.
- Vogel, S. (2009). "Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape." *New Phytologist* 183: 13-26.
- Vollsinger S., Doppler, F. (2000). "Ermittlung des Stabilitätsverhaltens von Ufergehölzen im Zusammenhang mit Erosionprozessen an Wildbächen." Bericht vorgelegt am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich.
- Vollsinger S., Mitchell SJ, Byrne KE, Novak MD, Rudnicki M. (2005). "Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species." *Can. J. Forest Res.* 35:1238–1249.
- Wahl, T.L. (2000). *Analyzing ADV Data Using WinADV*, Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management. Minneapolis, MN.
- Weissteiner, C. (2009). „Biomechanical behavior of plants under hydraulic load.“ Report of the research service of the University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Wien. Unveröffentlicht.
- Wessolly, L., Erb, M. (1998). "Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle." ISBN 3-87617-093-1, Patzer-Verlag, Berlin, Deutschland.
- Wilkerson, G.V. (2007). "Flow through trapezoidal and rectangular channels with rigid cylinders." *J. Hydraul. Eng.*, 133(5), 521-533.
- Wilson, C.A.M.E., Schnauder, I., Mas, J., and Hoyt, J. (2005). "Measuring the drag force of vegetation." In B.-H. Jun, S.-I. Lee, I.W. Seo & G.-W. Choi (eds), *Water engineering for the future – choices and challenges, XXXI IAHR Congress*, Seoul, 11-16 September 2005, 2142-2151, Seoul: IAHR.

- Wilson, C.A.M.E., Yagci, O., Rauch, H.-P., Stoesser, T. (2006). Application of the drag force approach to model the flow-interaction of natural vegetation. *Intl. J. River Basin Management* Vol.4, No.2 (2006), 137-146.
- Wilson, C.A.M.E., Hoyt, J., and Schnauder, I. (2008). "Impact of foliage on the drag force of vegetation in aquatic flows." *J. Hydraul. Eng.*, 134(7), 885-891.
- Wilson, C.A.M.E., Xavier, P., Schoneboom, T., Aberle, J., Rauch, H.-P., Lammeranner, W., Weissteiner, C. & Thomas, H. (2010). "The Hydrodynamic Drag of Full Scale Trees." *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2010*, 8-10 September 2010, Braunschweig, Germany. Edited by A. Dittrich, Ka. Koll, J. Aberle & P. Geisenhainer, BAW, pp. 453-459.
- Wilson, N. R., Shaw, R. (1977). „A higher order closure model for canopy flow.“ *J. Appl. Meteor.* 16, 1198-1205.
- Wu, F.-C., Shen, H.W. and Chou, Y.-J. (1999). "Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation." *J. Hydr. Engrg.* 125(9): 934–942.
- Xavier, P. (2010): Floodplain Woodland Hydrodynamics. Doctoral thesis. Cardiff University.
- Xavier, P., Wilson, C.A.M.E., Aberle, J., Rauch, H.P., Schoneboom, T., Lammeranner, W. & Thomas, H. (2010). "Drag force of flexible submerged trees." *Proc. Hydralab Closing Event*, Hannover, Deutschland.
- Yen, B.C. (2002). „Open channel flow resistance.“ *J. Hydraul. Eng.* 128(1), 20-39.
- Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H., Hozumi, K. (1963). „Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI).“ *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University, Series D*, Vol. 14, (107-129).

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A1	Versuchseinrichtungen	A-2
	A1.1 Kraftmessgeräte DFS.....	A-2
	A1.2 CEHIPAR Schleppkanal.....	A-3
A2	Vergleichbarkeit zwischen künstlicher und natürlicher Vegetation.....	A-6
A3	Sohlen- und Vegetationswiderstand in durchströmten Bewuchsfeldern.....	A-8
	A3.1 Versuchseinrichtung	A-8
	A3.2 Messdauer der Kraftmessungen.....	A-9
	A3.3 Widerstandskraft.....	A-10
	A3.4 Widerstandsbeiwert	A-12
	A3.5 Hebelarm	A-13

A1 Versuchseinrichtungen

A1.1 Kraftmessgeräte DFS

Tab.A 1 Ergebnisse der Kalibriermessungen der Kraftmessgeräte DFS01 - DFS10.

applizierte Kraft [N]	gemessene Kraft F_D									
	DFS01 [N]	DFS02 [N]	DFS03 [N]	DFS04 [N]	DFS05 [N]	DFS06 [N]	DFS07 [N]	DFS08 [N]	DFS09 [N]	DFS10 [N]
0,020	0,022	0,020	0,021	0,019	0,019	0,018	0,024	0,020	0,021	0,022
0,049	0,053	0,048	0,047	0,047	0,048	0,046	0,050	0,047	0,050	0,047
0,098	0,110	0,096	0,092	0,099	0,098	0,094	0,095	0,093	0,100	0,098
0,196	0,199	0,193	0,195	0,197	0,194	0,189	0,198	0,191	0,206	0,193
0,491	0,487	0,484	0,489	0,499	0,487	0,491	0,495	0,484	0,494	0,484
0,687	0,683	0,683	0,689	0,701	0,685	0,686	0,695	0,682	0,692	0,686
0,981	0,981	0,977	0,991	1,000	0,982	0,980	0,992	0,977	0,993	0,976
1,472	1,485	1,472	1,486	1,487	1,477	1,479	1,483	1,472	1,489	1,468
1,962	1,975	1,963	1,980	1,981	1,976	1,977	1,972	1,965	1,980	1,954

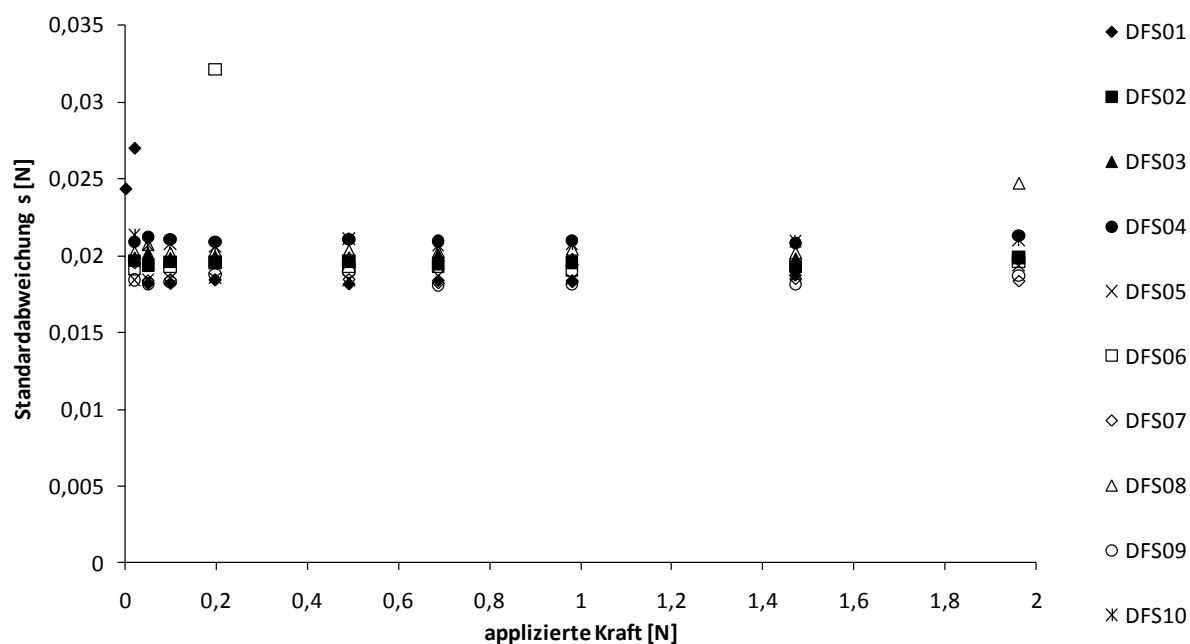


Abb. A 1 Standardabweichung der Kalibriermessungen für die Kraftmessgeräte DFS01 – DFS10.

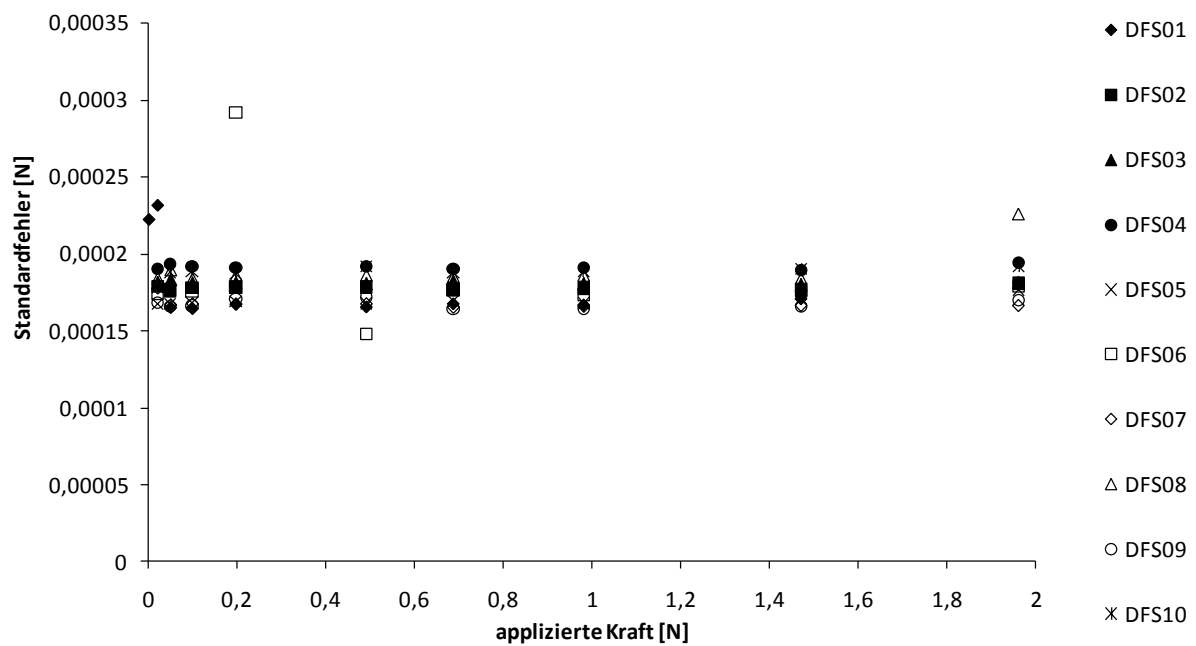


Abb. A 2 Standardfehler der Kalibriermessungen für die Kraftmessgeräte DFS01 – DFS10.

A1.2 CEHIPAR Schleppkanal

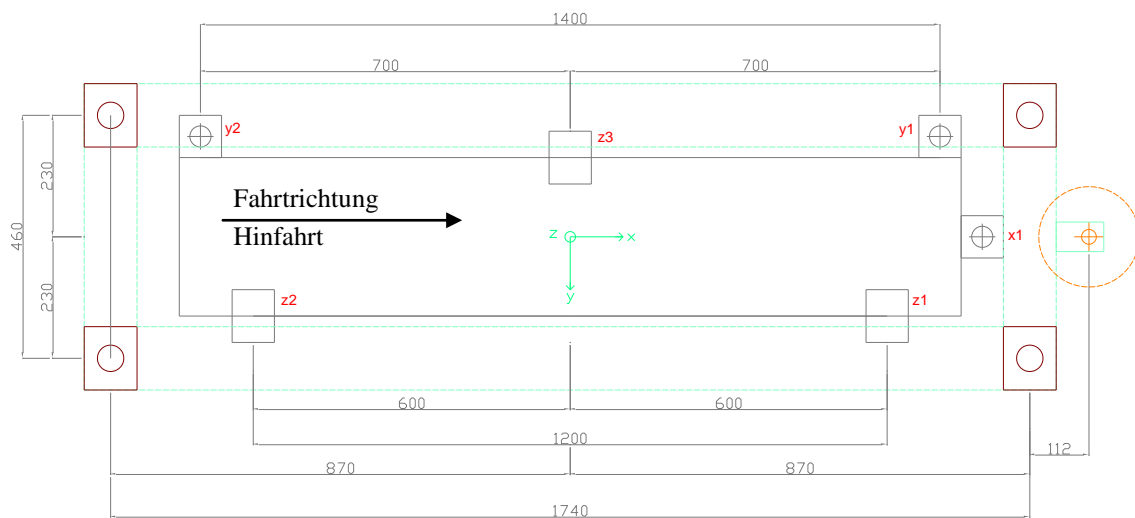


Abb. A 3 Draufsicht einer Prinzipskizze des Sechskomponenten Kraftmessgerätes im CEHIPAR Schleppkanal.

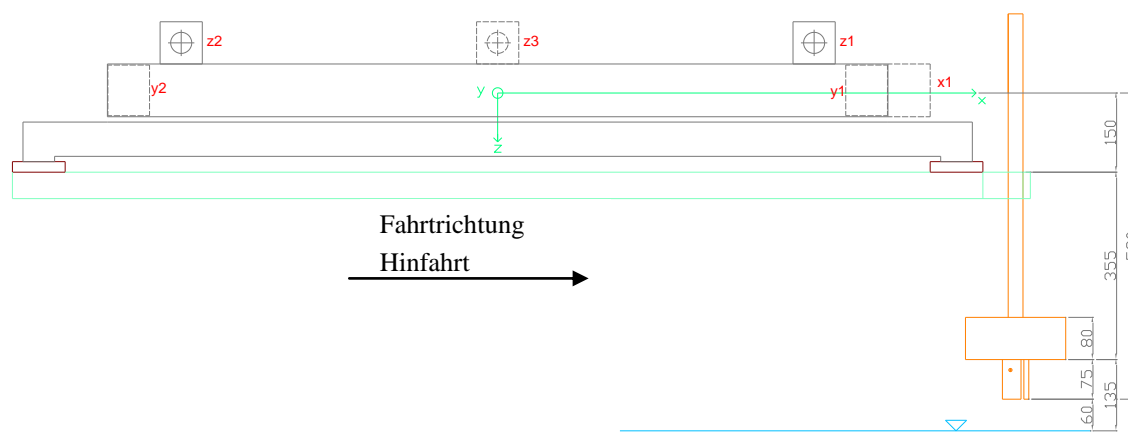


Abb. A 4 Ansicht einer Prinzipskizze des Sechskomponenten Kraftmessgerätes im CEHIPAR Schleppkanal.

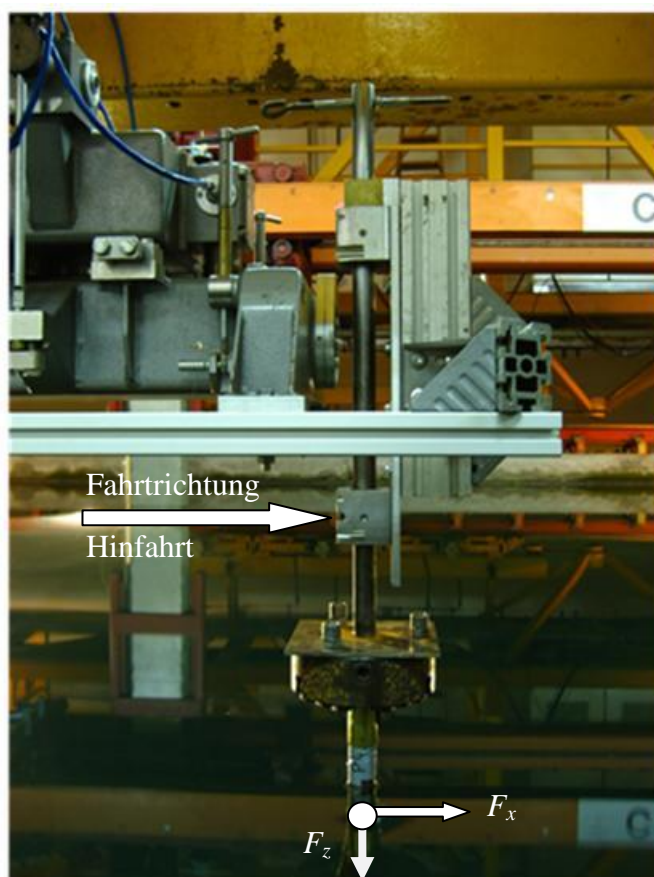


Abb. A 5 Seitenansicht der Einspannvorrichtung und des Kraftmessgerätes. In Weiß dargestellt ist der Kontaktpunkt und Ursprung des Bezugskoordinatensystems der berechneten Widerstandskräfte (Schnittpunkt WSP-Oberfläche mit dem Stamm des Vegetationselementes).

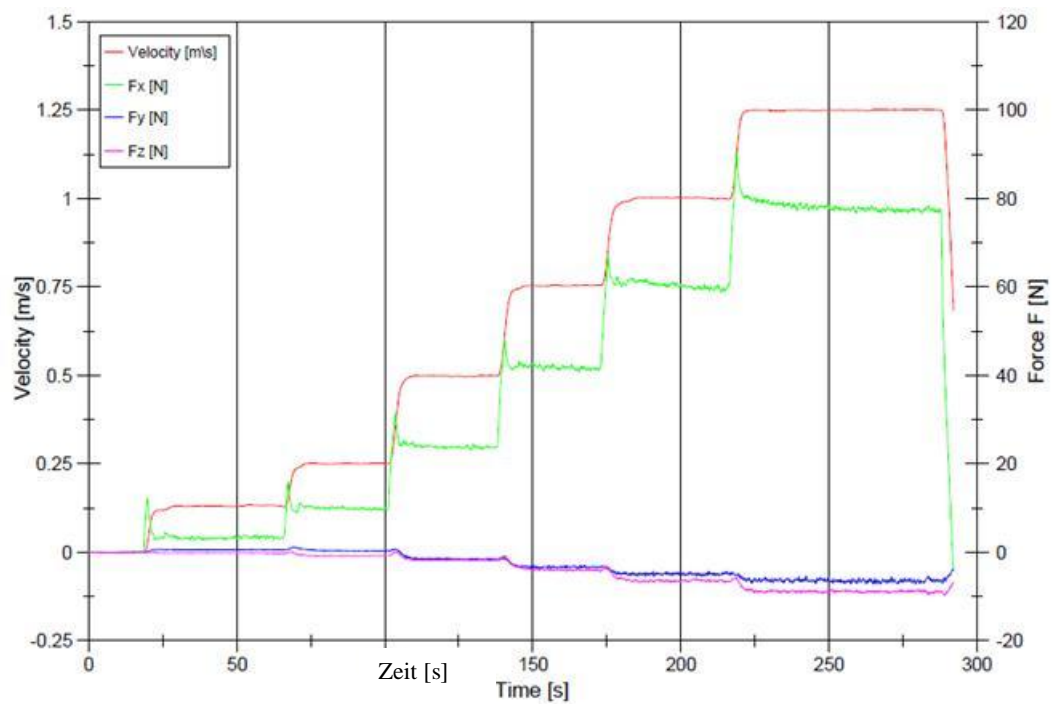


Abb. A 6 Widerstandskräfte und Fahrgeschwindigkeiten (rote Linie) einer Hinfahrt am Beispiel von Erle 1 im CEHIPAR Schleppkanal.

A2 Vergleichbarkeit zwischen künstlicher und natürlicher Vegetation

A2.1 Auswahl eines Vegetationselementes

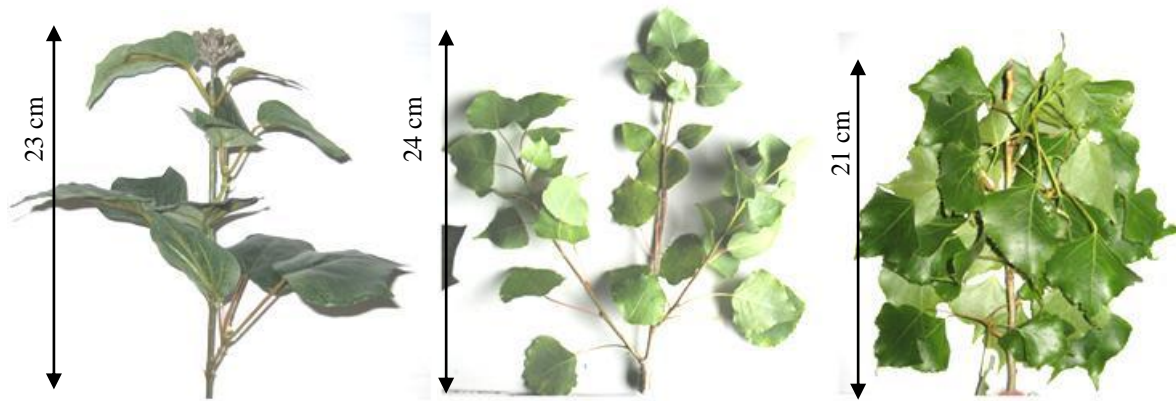


Abb. A 7 Ansicht der künstlichen Pappel (links), der natürlichen Pappel 1 (Mitte) und der natürlichen Pappel 2 (rechts). Maßstäbe siehe Kennzeichnung!

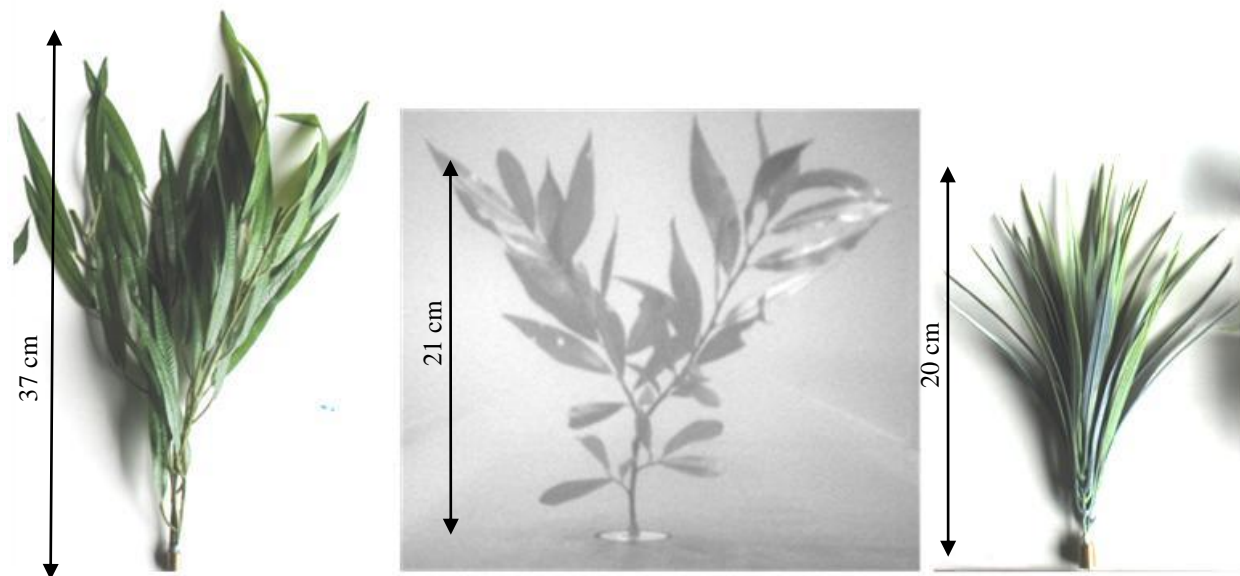


Abb. A 8 Ansicht der künstlichen Weide (links), der natürlichen Weide (mittig) und der künstlichen Segge (rechts). Maßstäbe siehe Kennzeichnung!

A2.2 Blattflächeneinfluss bei natürlichen Pappelzweigen



Abb. A 9 Ansicht der natürlichen Pappelzweige zur Untersuchung des Einflusses der Blattfläche auf das Widerstandsverhalten im Strömungskanal. Von links nach rechts stehend Pappel 1, Pappel 2, Pappel 3. Maßstab entsprechend der Kennzeichnung.

A2.3 Blattflächeneinfluss bei Büschen und Bäumen

Tab.A 2 Parameter der Vegetationselemente der Versuchsreihen zur Bestimmung des Blattflächeneinfluss bei Bäumen. Daten aus den Versuchsreihen, die im Rahmen des Hydralab Projektes durchgeführt worden sind.

Element	Erle 1	Erle 3	Erle 4	Erle 5	Weide 4	Weide 5 Ast 1	Weide 7 Ast 2	Weide 7 Ast 3	Weide 12
Höhe gesamt [cm]	245	260	240	180	200	360	230	218	410
Höhe 25% [cm]	61	65	60	45	50	90	57,5	54,5	103
Höhe 50% [cm]	123	130	120	90	100	180	115	109	205
Höhe 75% [cm]	184	195	180	135	150	270	172,5	163,5	308
Stammdurchmesser am Boden [cm]	5,84	2,84	2,71	2,83	2,29	4,71	3,15	3,15	2,91
Blattmasse [g]	148	120	144	102	132	298	72		84
Verdrängungsvolumen der Blätter [cm ³]	222		200	130		350			120
Holzmasse gesamt [g]	2110		1168	1228	714	1286	796		954

A3 Widerstandsverhalten von Bewuchsfeldern

A3.1 Versuchsaufbau

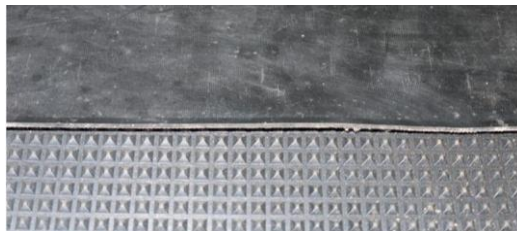


Abb. A 10 Ansicht der rauen Sohle mit regelmäßig angeordneten pyramidenförmigen Rauheitselementen mit einer Höhe von 3 cm (unten) und der glatten Sohle ohne Rauheitselemente (oben).

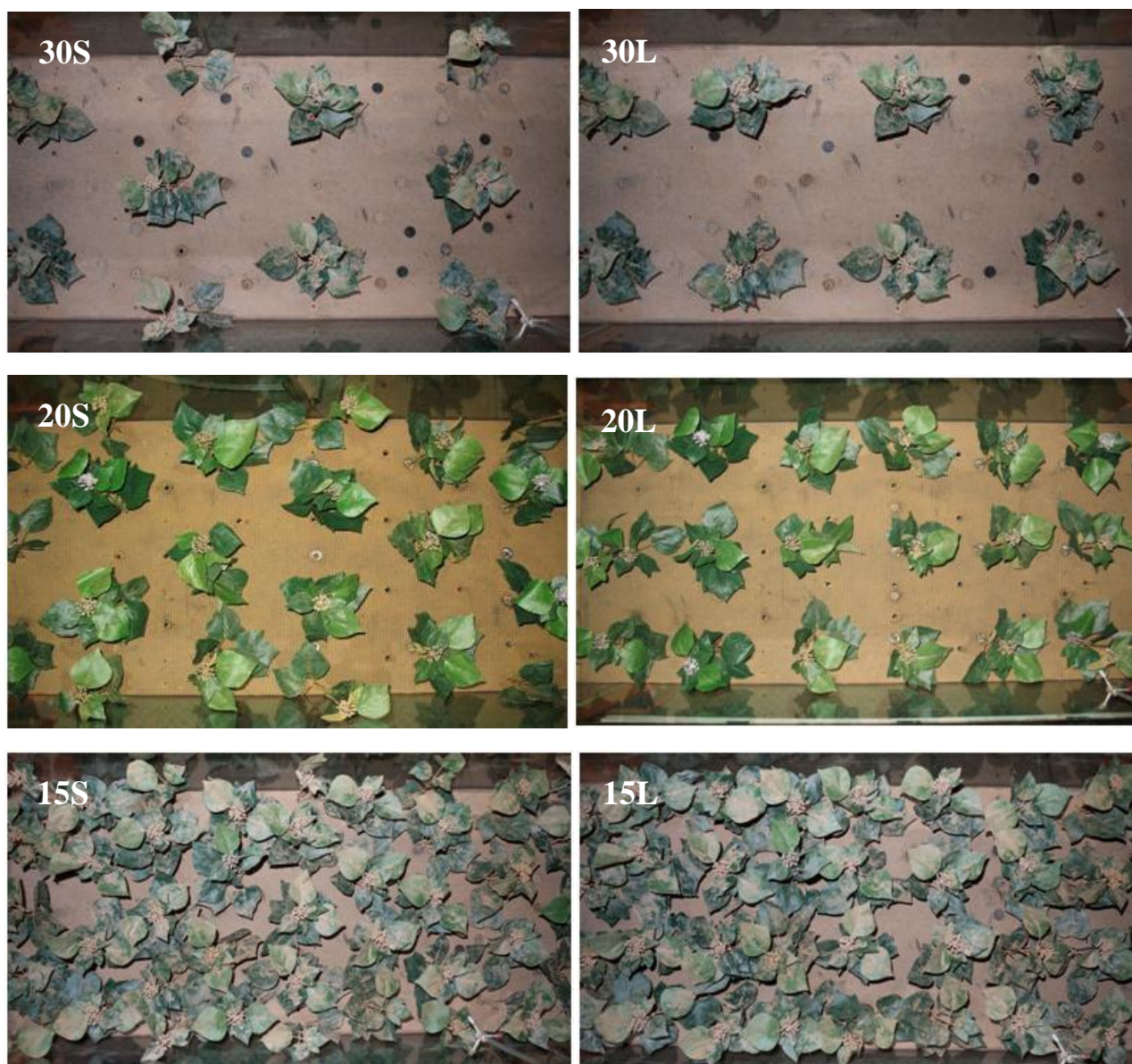


Abb. A 11 Fotografien des Messbereichs in der Draufsicht zur Untersuchung der Abhängigkeit von der Vegetationsdichte und -anordnung mit künstlichen Pappelzweigen. Versetzte Anordnung links, Reihenanordnung rechts. Abstände a_x und a_y von oben nach unten: 30, 20, 15 cm.

A3.2 Messdauer der Kraftmessungen

Zur Bestimmung der erforderlichen Messdauer für die Durchführung der Kraftmessungen wurden die kumulativen Mittelwerte der Zeitreihen der Widerstandskräfte bestimmt. In Abb. A 12 ist exemplarisch die Auswertung der kumulativen Mittelwerte für die Kraftmessgeräte DFS06 und DFS07 bei der Anordnung 20L dargestellt. Die empirische Standardabweichung für DFS06 wurde zu $s(F_{D,DFS06}) = 0,047 \text{ N}$ und für DFS07 zu $s(F_{D,DFS07}) = 0,069 \text{ N}$ bestimmt bei mittleren Widerstandskräften $F_{D,DFS06} = 1,01 \text{ N}$ und $F_{D,DFS07} = 1,0 \text{ N}$. Die Messungen wurden mit einer Datenrate von 200 Hz bei einer Messdauer von 60s durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Anzahl von 12000 Datenpunkten je Zeitreihe. Dargestellt in Abb. A 12 ist die momentane Abweichung des kumulativen Mittelwertes der Widerstandskraft vom Mittelwert der Widerstandskraft der gesamten Zeitreihe in Abhängigkeit von der Datenanzahl dargestellt.

Die Abbildung zeigt, dass der kumulative Mittelwert von DFS07 bereits ab 3000 Datenpunkten (15 s) gegen Null tendiert. Für DFS06 tendiert der kumulative Mittelwert ab 6000 Datenpunkten, was einer Messdauer von 30 s entspricht, gegen Null. Die Abweichungen zwischen dem kumulativen Mittelwert und dem Mittelwert der gesamten Zeitreihe sind bereits ab einer Messdauer von 15 s geringer als $\pm 0,01 \text{ N}$. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass eine Messdauer von 60s für eine Einzelkraftmessung der Vegetationselemente ausreicht.

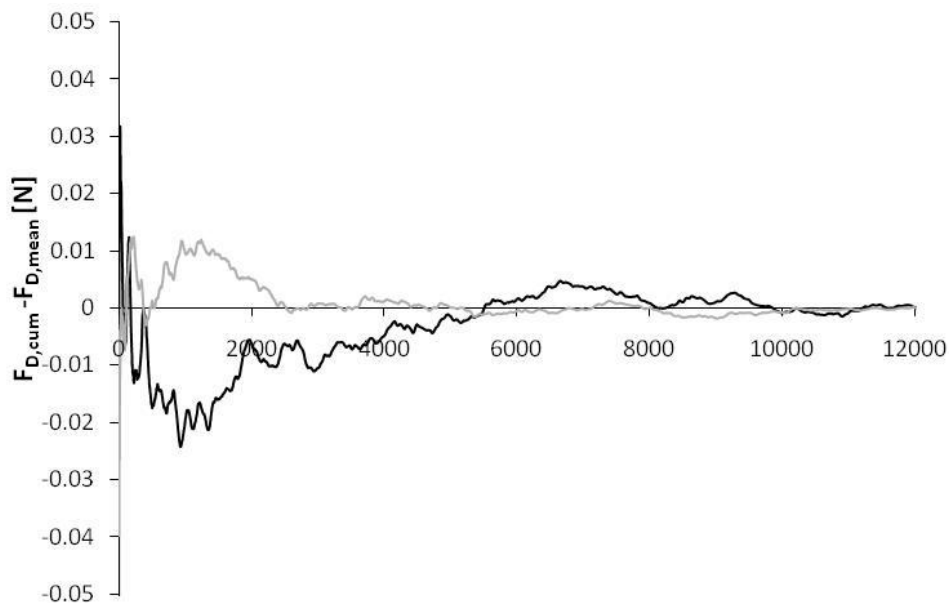


Abb. A 12 Kumulativer Mittelwert der Widerstandskraft $F_{D,cum} - F_{D,MW}$ exemplarisch für Anordnung 20L, DFS06 (schwarz) und DFS07 (grau).

A3.3 Widerstandskraft F_D

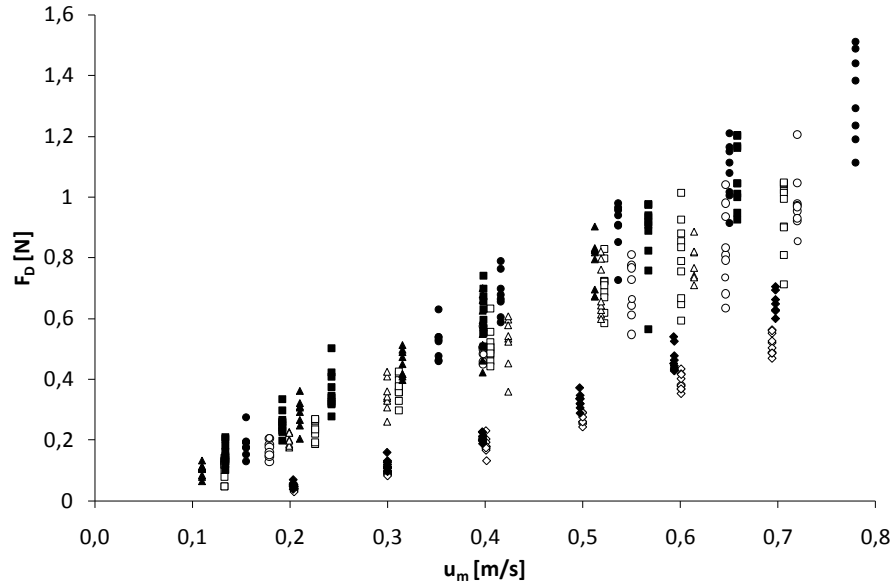


Abb. A 13 Zeitlich gemittelte Widerstandskräfte der einzelnen Vegetationselemente (starr und flexibel) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll), 20L_Zyl (Raute offen), 20S_Zyl (Raute voll).

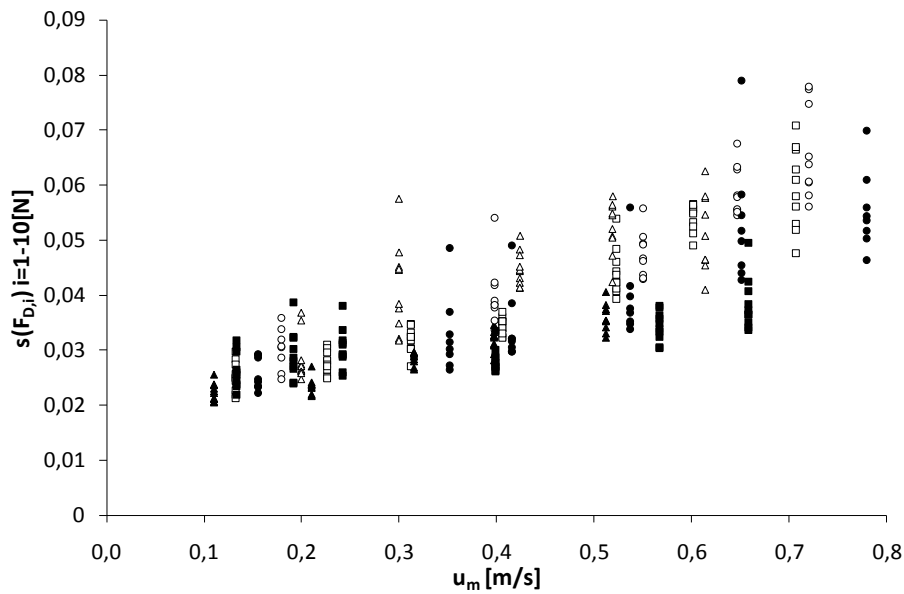


Abb. A 14 Standardabweichung der Zeitreihen der Widerstandskräfte der einzelnen Vegetationselemente (flexibel) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).

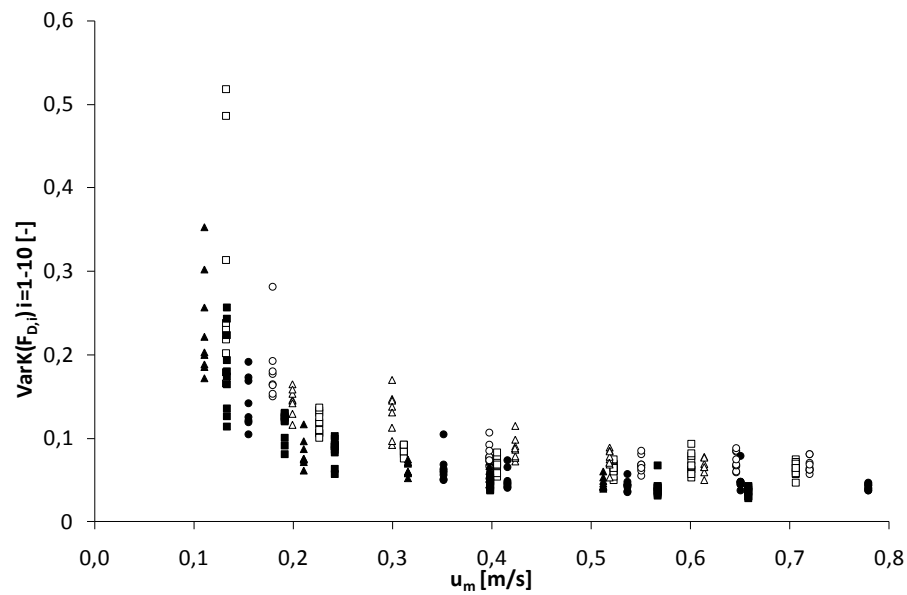


Abb. A 15 Variationskoeffizient der Zeitreihen der Widerstandskräfte der einzelnen Vegetationselemente (flexibel) in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).

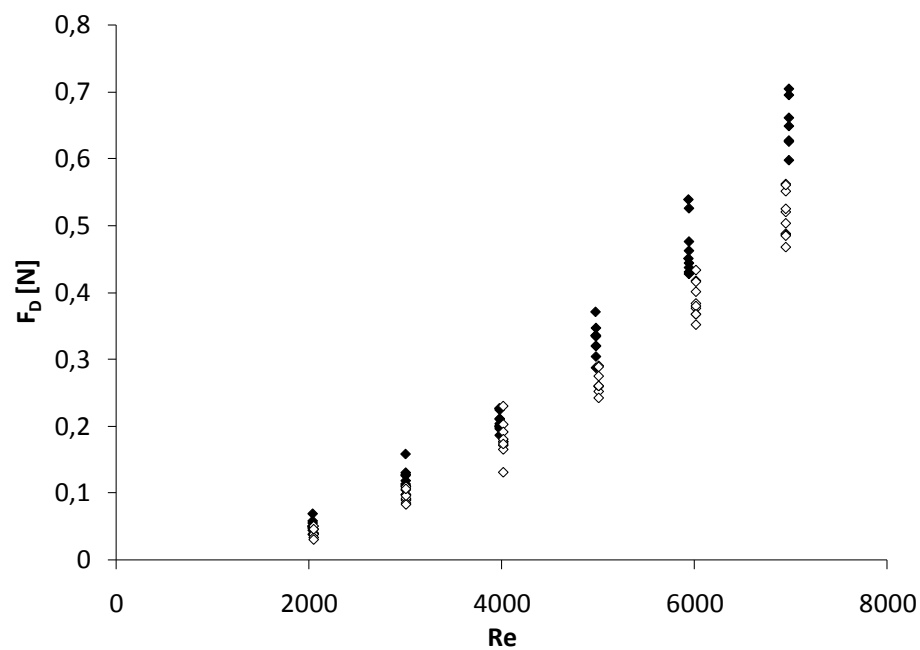


Abb. A 16 Zeitlich gemittelte Widerstandskräfte der starren Zylinder in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 20L_Zyl (Rauten offen), 20S_Zyl (Rauten voll).

A3.4 Frontal projizierte Fläche A_P

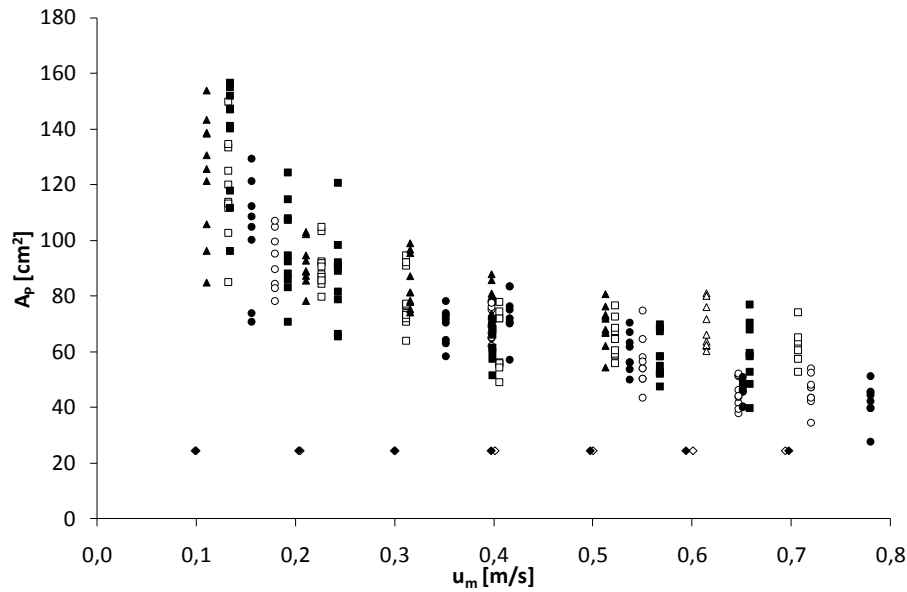


Abb. A 17 Frontal projizierte Fläche A_P der künstlichen Pappelzweige in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll), 20L_Zyl (Raute offen), 20S_Zyl (Raute voll).

A3.5 Widerstandsbeiwert C_D

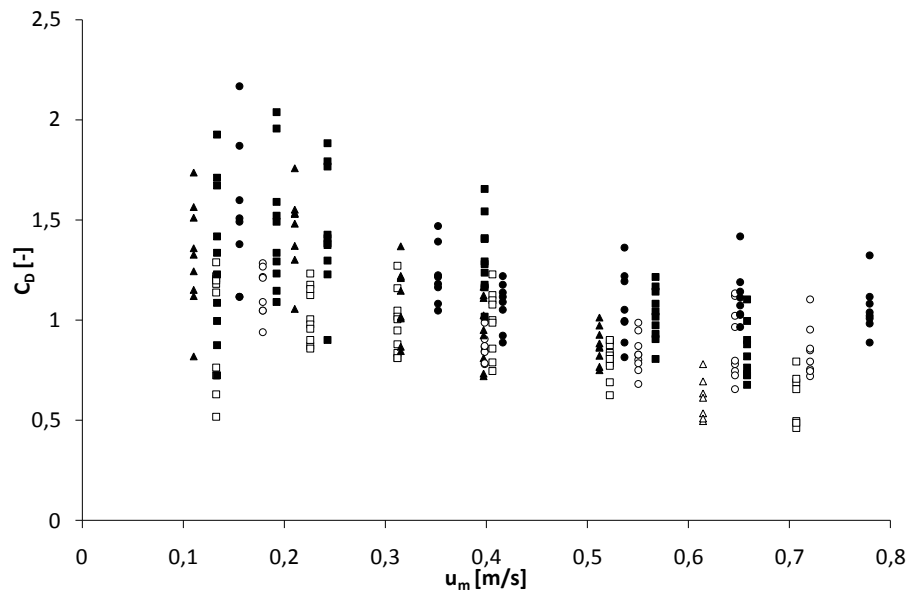


Abb. A 18 Widerstandsbeiwerte C_D der künstlichen Pappelzweige in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).

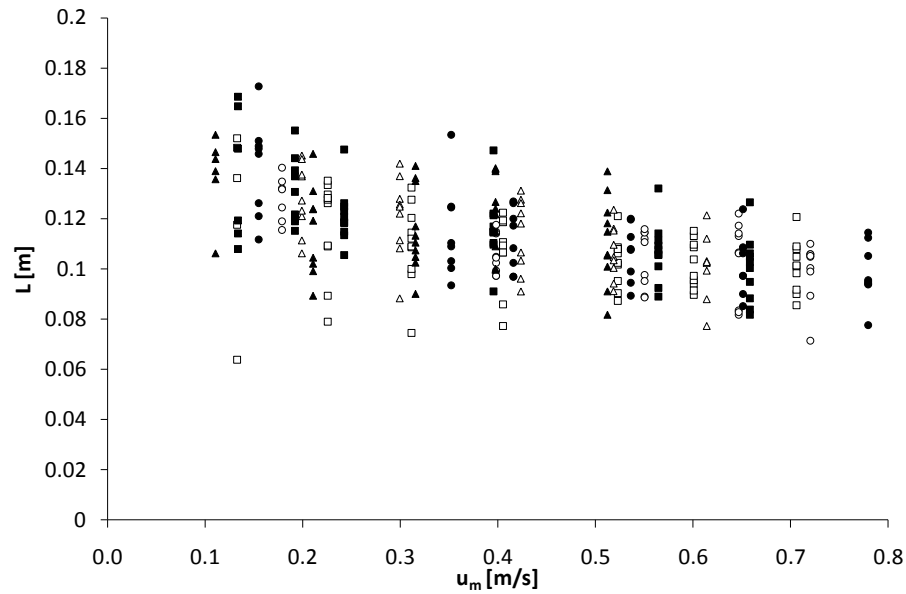
Hebelarm L 

Abb. A 19 Mittlerer Hebelarm L der resultierenden Widerstandskraft der einzelnen Kraftmessgeräte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).

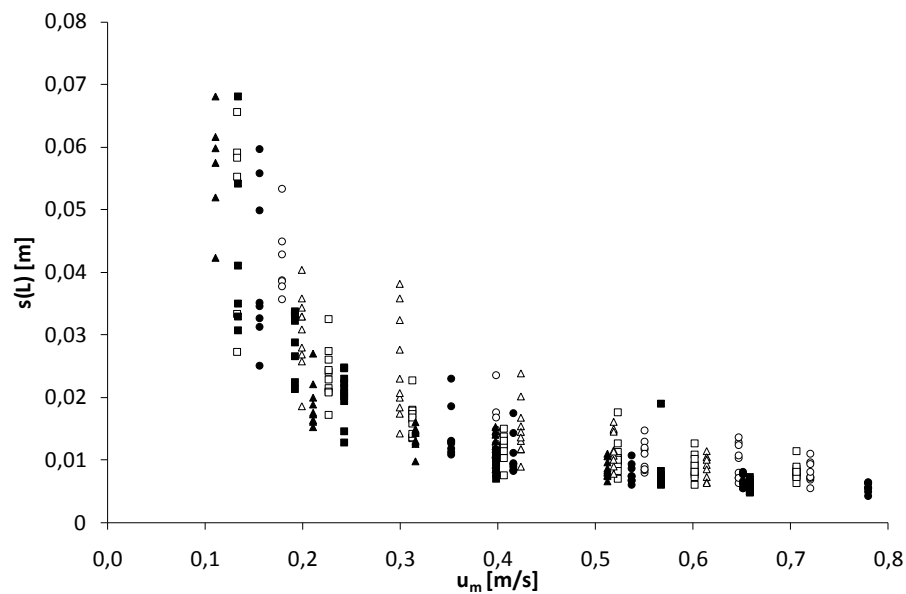


Abb. A 20 Mittlere Standardabweichung des Hebelarmes L der resultierenden Widerstandskraft der einzelnen Kraftmessgeräte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).

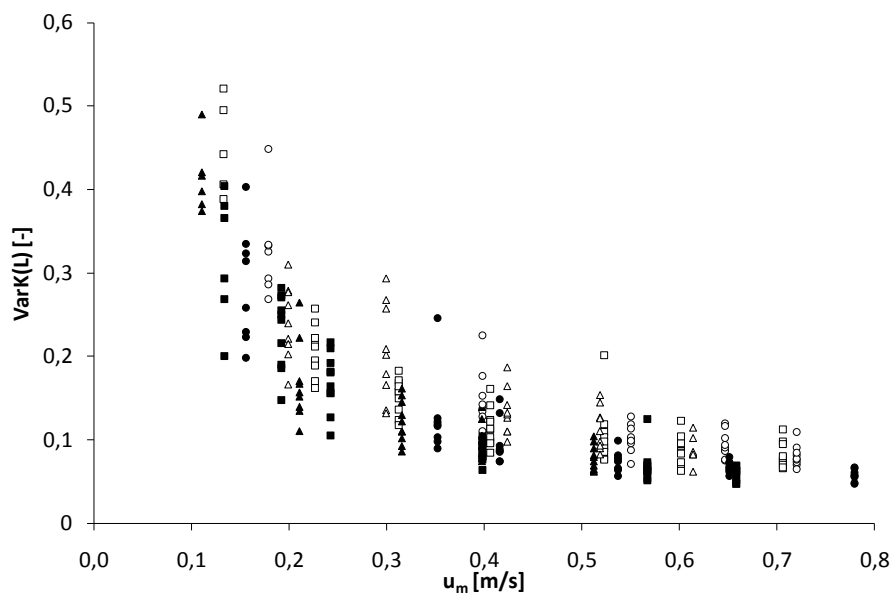


Abb. A 21 Mittlerer Variationskoeffizient des Hebelarmes L der resultierenden Widerstandskraft der einzelnen Kraftmessgeräte in Abhängigkeit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, 30L (Kreis offen), 30S (Kreis voll), 20L (Quadrat offen), 20S (Quadrat voll), 15L (Dreieck offen), 15S (Dreieck voll).